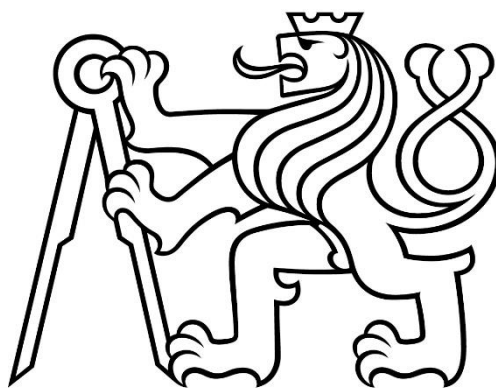


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace provozního režimu plavebních komor

Vnorovy I a Vnorovy II

Optimalization of lock operation Vnorovy I – Vnorovy II

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Leden 2020

Bc. Veronika MORAVOVÁ

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Moravová	Jméno: Veronika	Osobní číslo: 438458
Zadávající katedra: 142 - Katedra hydrotechniky		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Optimalizace provozního režimu plavebních komor Vnorovy I a Vnorovy II	
Název diplomové práce anglicky: Optimization of lock operation Vnorovy I a Vnorovy II	
Pokyny pro vypracování: Plavební komory Vnorovy I a Vnorovy II se nachází na Baťově kanále v úseku Veselí nad Moravou - Petrov. Plavební komory slouží pro zajištění plavebního provozu na křížení Baťova kanálu a řeky Moravy a tvoří společně s jezem Vnorovy a shybkou pro napájení Baťova kanálu vodohospodářský uzel. S ohledem na rekonstrukci Baťova kanálu a výrazným zvýšením jeho turistické a rekreační atraktivity dochází k významnému navýšení frekvence proplavení během plavební sezóny a roste potřeba proplavovací vody z řeky Moravy. Prvním cílem diplomové práce je posoudit a navrhnout možnosti realizace úsporných nádrží pro zajištění úspornějšího proplavování na plavebních komorách. Druhým cílem diplomové práce je navrhnout a posoudit systém účinnějšího tlumení kinetické energie při plnění plavebních komor z důvodu bezpečného zkrácení proplavovacího cyklu a zvýšení přepravní kapacity.	
Seznam doporučené literatury: Čábelka, J.: Vodní cesty a plavba. SNTL/ALFA, Praha 1976. Gabriel, P.: Vodní cesty, skriptum ČVUT v Praze, 1997. Gabriel, P., Medřický, V.: Navrhování plavebních stupňů, skriptum ČVUT v Praze, 1991. Medřický, V.: Hydrotechnické stavby 2. Vodní cesty, skriptum ČVUT v Praze, 2006. Medřický, V., Valenta, P.: Vodní cesty. Navrhování plavebních komor. skriptum ČVUT v Praze, 2009.	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur	
Datum zadání diplomové práce: 26. 9. 2019	Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze dne

.....

Veronika Moravová

Poděkování

Chtěla bych tímto poděkovat panu doc. Dr. Ing. Pavlovi Fošumpaurovi za odborné vedení, cenné rady a pomoc při zpracování mé diplomové práce. Další poděkování patří státnímu podniku Povodí Moravy, především panu Ing. Lukášovi Navrátilovi a organizaci Ředitelství vodních cest České republiky, především panu Ing. Martinovi Vavříčkovi a Ing. Filipovi Duškovi za poskytnutí podkladů a odbornou pomoc. Dále děkuji Ing. Tomášovi Kašparovi za vstřícný přístup, odbornou pomoc a cenné rady při zpracování části diplomové práce zabývající se matematickým modelováním. V neposlední řadě děkuji Výpočetnímu a informačnímu centru ČVUT za umožnění provedení výpočtů na výkonném počítači.

ANOTACE

Předmětem diplomové práce je posouzení možnosti návrhu úsporných nádrží na plavebních komorách s malým spádem. Řešené plavební komory Vnorovy I a Vnorovy II se nachází na Baťově kanálu. Práce se dále zabývá posouzením stávajícího plnicího systému plavební komory Vnorovy I. Nejprve byl systém posouzen na maximální sílu v úvazných lanech. V další části práce je řešeno proplavování plavidel s důrazem na tlumení kinetické energie a s tím spojených rychlostí na počátku užité délky plavební komory. Pro posouzení byl vytvořen matematický model v programu ANSYS Fluent. V závěru je řešeno možné opatření pro zajištění bezpečného proplavování při plnění plavební komory.

Klíčová slova

Plavební komora, úsporné nádrže, plnění, prázdnění, tlumení kinetické energie, matematické modelování, ANSYS Fluent

ANNOTATION

The subject of the diploma thesis is to assess the possibility of designing thrift basins on locks with a low head. The lock chambers Vnorovy I and Vnorovy II are located on the Baťa Canal. The thesis also deals with the assessment of the existing filling system of the Vnorovy I lock. Firstly, the system was assessed at the maximal strength of mooring ropes. The next part of the diploma thesis deals with passing of the vessels through the lock focused on the dissipation of the kinetic energy and forces on barges at the beginning of the utility length of the lock chamber. A mathematical model in ANSYS Fluent was created for its assessment. The end of the diploma thesis deals with the possibility of measures to ensure safe passing of vessels while filling the lock.

Keywords

Lock, thrift basins, filling, emptying, dissipation of kinetic energy, mathematical modelling, ANSYS Fluent

OBSAH

1. ÚVOD	4
2. BAŤŮV KANÁL	5
2.1. Historie Baťova kanálu	6
2.2. Baťův kanál dnes	7
2.3. Rekreační plavba na Baťově kanálu	9
3. PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I A VNOROVY II	12
3.1. Plavební komora Vnorovy I	15
3.2. Plavební komora Vnorovy II	17
4. PLNĚNÍ A PRÁZDNĚNÍ PLAVEBNÍ KOMORY	20
4.1. Doba plnění (prázdnění) plavební komory	20
4.2. Průběh plnění (prázdnění) plavební komory	22
4.3. Síly působící na loď v plavební komoře	23
5. VÝPOČET DOBY PLNĚNÍ A PRÁZDNĚNÍ PLAVEBNÍCH KOMOR	28
5.1. Plavební komora Vnorovy I	28
5.1.1. Plnění plavební komory Vnorovy I	28
5.1.2. Prázdnění plavební komory Vnorovy I	30
5.2. Plavební komora Vnorovy II	32
5.2.1. Plnění plavební komory Vnorovy II	32
5.2.2. Prázdnění plavební komory Vnorovy II	33
6. POTŘEBA VODY	36
6.1. Potřeba vody k proplavení u plavební komory	36
6.1.1. Potřeba vody – Plavební komora Vnorovy I	38
6.1.2. Potřeba vody – Plavební komora Vnorovy II	38
7. ÚSPORNÉ NÁDRŽE	39
7.1. Návrh úsporných nádrží – potřeba a úspora vody	41

7.1.1.	Návrh úsporných nádrží – Plavební komora Vnorovy I.....	42
7.1.1.1.	Doba plnění a prázdnění - varianta 1	45
7.1.1.2.	Doba plnění a prázdnění – varianta 4	48
7.1.2.	Návrh úsporných nádrží – Plavební komora Vnorovy II.....	51
8.	TLUMENÍ KINETICKÉ ENERGIE	52
8.1.	Matematické modelování turbulentního proudění.....	52
8.2.	Program ANSYS Fluent	53
8.3.	Využití superpočítače SGI ALTIX UV 100	54
8.4.	Tvorba modelu.....	54
8.5.	Geometrie a výpočetní síť.....	55
8.6.	Nastavení modelu	56
8.6.1.	Okrajové podmínky	56
8.6.1.1.	Vtok do modelu	57
8.6.1.2.	Výtok z modelu.....	57
8.6.1.3.	Stěny modelu	58
8.6.2.	Počáteční podmínka.....	58
8.7.	Výpočet a ustálení modelu.....	58
8.8.	Vyhodnocení stávajícího stavu	60
8.9.	Návrh opatření	63
8.9.1.	Varianta 1 – prohloubení uklidňovací komory	63
8.9.2.	Varianta 2 – usměrňovací válce.....	65
8.9.3.	Varianta 3 – usměrňovací tyče	67
8.9.4.	Varianta 4 – kombinace varianty 2 a varianty 3	70
8.10.	Porovnání jednotlivých variant.....	71
9.	ZÁVĚR.....	73
10.	POUŽITÁ LITERATURA	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76

SEZNAM TABULEK.....	78
SEZNAM PŘÍLOH	79

1. ÚVOD

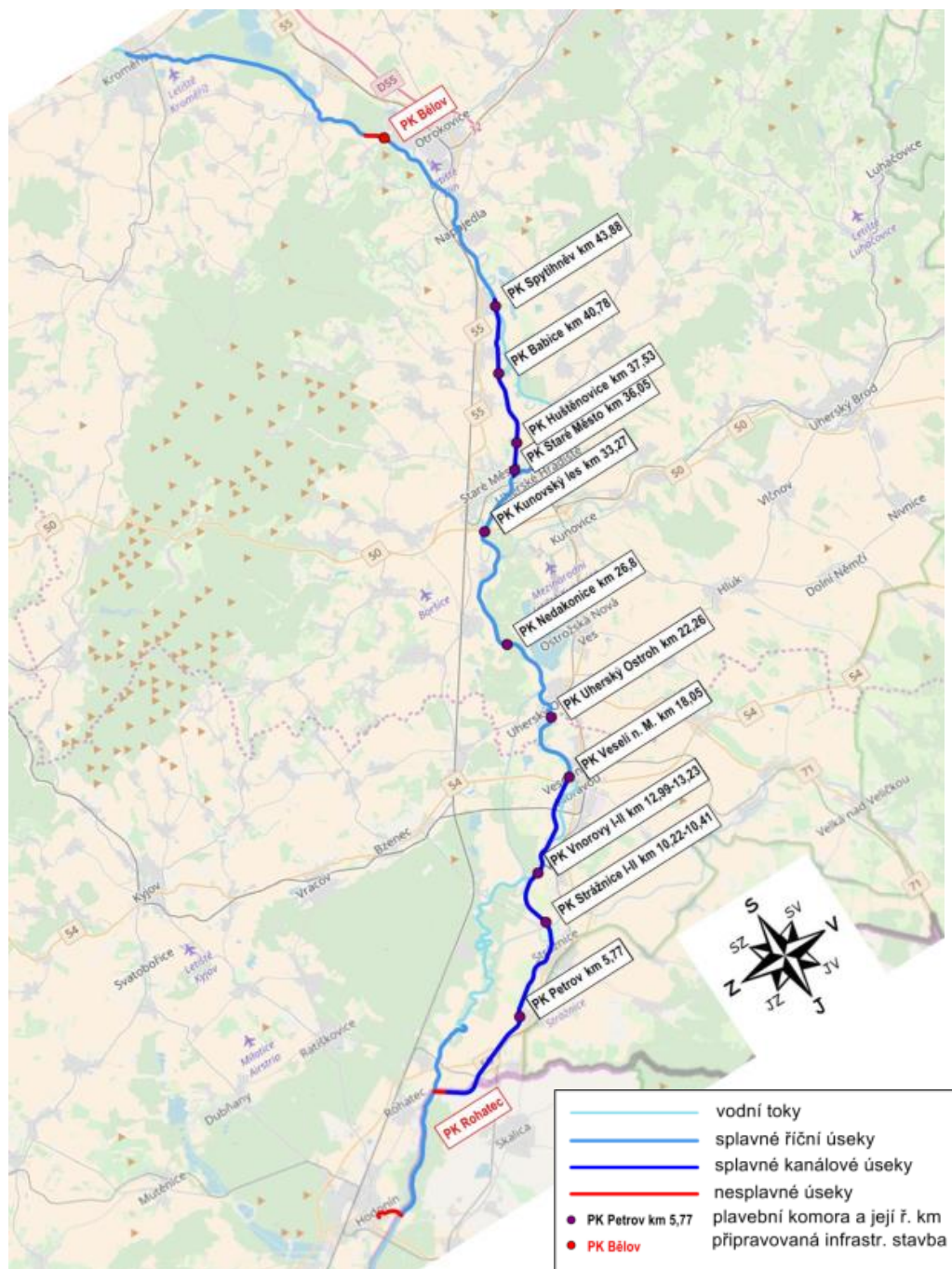
Diplomová práce se zabývá plavebními komorami Vnorovy I a Vnorovy II, které se nachází v jižní části Baťova kanálu. V první části je popsána historie a současný stav Baťova kanálu a řešených plavebních komor.

V další části je posouzena možnost realizace úsporných nádrží na řešených plavebních komorách. Mezi zmíněnými plavebními komorami dochází ke křížení kanálu s řekou Moravou. Při proplavování se voda potřebná k proplavení vzhledem k výškovému uspořádání komor a kanálu vypouští do řeky Moravy. V posledních letech výrazně vzrostla poptávka po rekreační plavbě v České republice. Baťův kanál a plavba po něm tvoří důležitou turistickou atrakci v kraji. Výrazně tak především v letních měsících vzrostl počet proplavení zmíněnými plavebními komorami. V předešlých málo vodních letech byl zaznamenán problém s množstvím vody v průplavu a s tím spojená možnost proplavování plavebními komorami. Možným řešením by mohla být právě realizace úsporných nádrží. V této části práce je řešena úspora a potřeba vody, výškové uspořádání úsporných nádrží a také doba prodloužení proplavovacího cyklu při využití těchto nádrží.

Druhým cílem této diplomové práce je posouzení stávajícího stavu plnicího systému plavební komory Vnorovy I za účelem bezpečného proplavování především malých plavidel. Pro toto posouzení byl výpočet prováděn v programu ANSYS Fluent. Tomuto výpočtu se věnují další kapitoly. V práci je uvedena možnost použití matematických modelů pro turbulentní proudění a dále samotné nastavení výpočtu. V další části je vyhodnocen stávající stav pomocí maximálních rychlostí na počátku užité délky plavební komory. V poslední části je navrženo několik variant pro zlepšení tlumení kinetické energie při plnění plavební komory. Tyto varianty jsou dále samostatně vyhodnoceny a porovnány s původním stavem. V závěru této práce je uvedeno zhodnocení výpočtu a shrnutí výsledků.

2. BAŤŮV KANÁL

Baťův kanál neboli průplav Otrokovice – Rohatec je dopravně významná využívaná vodní cesta třídy 0. Některé úseky jsou vedeny korytem řeky Moravy, jinde je využito uměle vytvořeného kanálu. Řešené plavební komory Vnorovy I a Vnorovy II se nachází ve východní části jižní Moravy na Baťově kanálu. Na Obr. 1 je zakreslen průběh celé vodní cesty včetně dvou připravovaných plavebních komor.



Obr. 1 - Průběh vodní cesty [1]

2.1. Historie Baťova kanálu

Po neúplně vydařených regulačních úpravách řeky Moravy bylo třeba zamezit vysychání pozemků a na některých úsecích chránit území před povodněmi. V době návrhu kanálu byla mezi největší podnikatele v regionu řazena firma Tomáše Bati – Baťa. Původní myšlenka úpravy koryta pro velké vlečné čluny byla změněna na kanál určený pro malou říční plavbu. V roce 1933 firma zveřejnila a zároveň požádala o vodoprávní povolení pro plavební komory Uherský Ostroh a Hodonín. Firma měla zájem o dopravu lignitu po vodě namísto po nerentabilní železnici. [2]

Hlavním cílem kanálu bylo zajistit úrodnost okolních pozemků a umožnit plavbu nákladních lodí o nosnosti 100-150 tun. Stavba byla zahájena v říjnu roku 1934. Pro zvýšení zaměstnanosti v regionu byly práce co nejméně mechanizované a na pracích se podílelo velké množství osob. Stavba byla vyčíslena na 35 milionů Kč, na této částce se zčásti podílela právě firma Baťa. Vodní cesta původně měla skončit u Hodonína, při výstavbě však byla ukončena v Rohatci. Finalizace výstavby se datuje ke konci roku 1938. V některých místech kanál umožňoval pouze jednosměrný provoz, proto byly pro lodě zřízeny výhybny. Jako tažná síla se na kanále využívala koňská síla, později bylo využito traktorů. Při plavbě bylo nutno překonat spád 18 m pomocí 14 plavebních komor. Zajímavostí byla výletní loď Mojena, která předznamenala turistické využití kanálu. Při výstavbě byl zároveň vybudován závlahový systém, který tvořila síť náhonů, nápusných a zdymacích stavidel a odpadních příkopů. Ke zvyšování hladiny pomáhaly vybudované jezy na trase. Konkrétně dříve postavené u Uherského Ostrohu a Veselí nad Moravou a nové ve Spytihněvi, Kunovickém Lese, u Nedakonic, ve Vnorovech a Hodoníně. [2]

Při průchodu vojsk za 2. světové války byl kanál poškozen a obnova díky nedostatku pracovních sil a stavebního materiálu byla náročná. Po znárodnění firmy Baťa bylo postupně od převážení lignitu upuštěno a v roce 1961 byl provoz vodní cesty ukončen. [2]

Kanál byl převeden pod správu státní organizace Povodí Moravy. Probíhaly pouze udržovací práce a kanál začal vyžadovat stále větší stavební i technologické zásahy. Iniciativa k obnovení vznikla v 80 letech 20. století, kdy mělo docházet k dopravě šterkopísku a v další etapě pak i kusových zásilek a kontejnerů. Zasluhou státního podniku probíhaly opravy a byla zprovozněna velká část kanálového úseku. Po změně politického režimu v roce 1989 byly práce opět téměř zastaveny. I přes pokles zájmu

provádělo Povodí Moravy udržovací práce a v roce 1993 bylo vyčištěno koryto v úseku Veselí nad Moravou – Vnorovy. [2]

Znovuobnovení plavby proběhlo v roce 1995 slavnostním zahájením v důsledku iniciativy Povodí Moravy, Státní plavební správy Přerov a Ekotransmoravia a.s. Akce se dostala do povědomí i nadregionálně a v roce 1995 bylo přepraveno výletní lodí kolem 5000 pasažérů. Vodní cesta byla opět přidána do významných vodních cest dopravně využitelných podle zákona č.114/1995 Sb. Zároveň vznikla Agentura pro rozvoj turistiky na Baťově kanále, která se zasloužila o rozvoj turismu této památky, například podporou soukromých půjčoven lodí. Nadále probíhaly stavební práce, rekonstrukce a modernizace plavebních komor, těžení nánosů apod. Došlo k prodloužení plavební cesty do Strážnice a byla provedena také automatizace ovládacích prvků. Některé z těchto investičních akcí byly zajišťovány Ředitelstvím vodních cest České republiky. [3]

V roce 2002 došlo k dokončení základní etapy obnovy vodní cesty, kdy bylo v provozu všech 13 zrekonstruovaných plavebních komor. V následujících letech probíhaly další důležité investiční akce pod záštitou dvou subjektů – Povodí Moravy, s.p. a Ředitelství vodních cest ČR. [2] [3]

V současné době je vodní kanál přizpůsoben zejména pro potřeby turistické plavby. V návaznosti na to bylo vystaveno množství veřejných přístavišť a přístavů, soukromých půjčoven s možností vyvázání. V blízkosti nástupních a výstupních míst je zřízeno sociální a technické zázemí.[3]

2.2. Batův kanál dnes

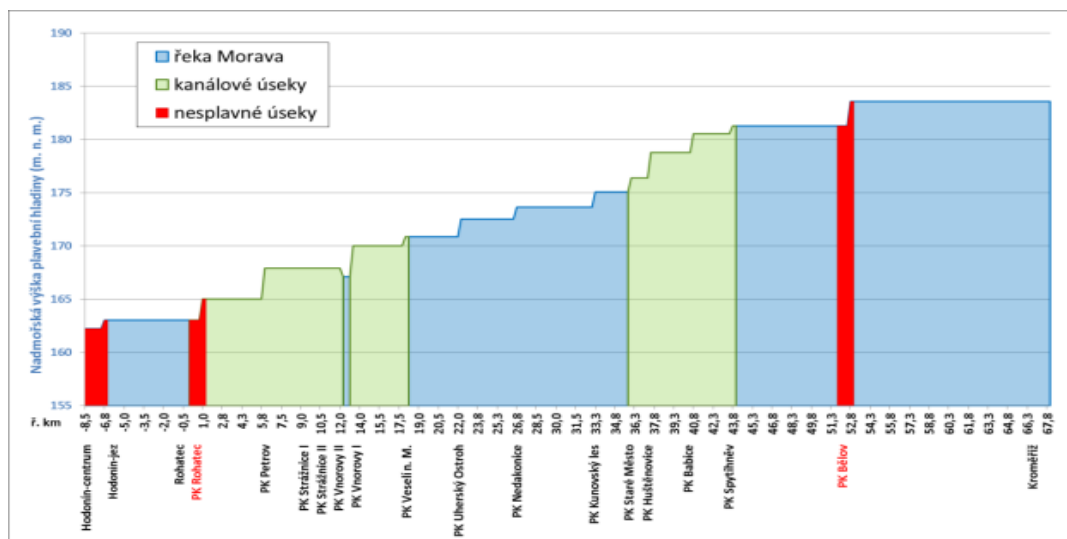
Batův kanál dnes tvoří důležitou turistickou atrakci pro celý region. K přispění atraktivity napomáhá také fakt, že cesta je zařazena do kategorie nejnižší obtížnosti a malé plavidlo do 1000 kg a motoru 4kW, zde může řídit osoba starší 18 let bez zvláštního povolení či průkazu. Na kanálových úsecích je maximální povolená rychlost 5 km/h. Mezi oblíbené aktivity se řadí i pravidelné plavby výletních lodí. [4]

Hloubka plavební dráhy je dnes průměrně 1,5 m. Maximální udávaná hloubka ponoru je 1,2 m, doporučený ponor pro lodě je však v důsledku zanesení menší než 80 cm. Pro bezpečné proplutí by loď neměla být širší než 5 m. V současnosti je na Baťově kanálu postaveno 13 plavebních komor, z toho je 11 plně automatizováno. [4]

Vodní cesta je dnes využívána převážně pouze pro rekreační plavbu. Dle platného manipulačního řádu jsou hlavními účely vodní cesty: plavba lodí za účelem dopravy materiálu, rekreace, turistika a zábava, přívod vody pro závlahy a za vedlejší účel se považuje rybářské využití. [5]

Oficiální odemykání plavební sezóny je většinou k 1. květnu a zavírání bývá v říjnu. Jestliže jsou příznivé podmínky, plavba funguje i po tomto termínu. Plavební komory jsou v provozu od června do srpna každý den mimo pondělí. V ostatních měsících, kdy probíhá plavba, jsou plavební komory v provozu pouze od pátku do neděle. Doba proplavování je od 9:30 do 18:00.[4]

Délka Baťova kanálu dnes dosahuje přibližně 53 km. Na vodní cestě je v dnešní době několik překážek. Prvním z nich je absence plavební komory Bělov v severní části kanálu. Absence komory brání napojení splavného úseku od Bělovského jezu do Kroměříže na zbylý úsek vodní cesty. V jižní části chybí plavební komora Rohatec, tato absence znemožňuje pokračování plavby do Hodonína. Po výstavbě těchto komor a úpravách koryta by vodní cesta dosahovala přibližně 76 km. Na Obr. 2 je zobrazen podélný profil vodní cesty, včetně rozlišení kanálových úseků a úseků vedoucích přímo řekou Moravou, navíc jsou zde uvedeny i již zmíněné připravované záměry.[1]



Obr. 2 - Podélný profil vodní cesty[1]

Mimo tyto zmíněné plány jsou z investičního hlediska připravovány projekty na modernizaci rejd plavebních komor, oprav opevnění kanálu a vybudování či rozšíření přístavní infrastruktury. Při realizaci záměru modernizace rejd, je předpoklad, že se zkrátí proplavovací cyklus, snížením času potřebného při manipulaci s plavidly při čekání a následném najíždění. Uvažuje se i se zkvalitněním parametrů plavební dráhy včetně značení. Na Obr. 3 je vyfocen pohled na dolní rejd plavební komory Vnorovy II, kde by v budoucnu mělo být dovybaveno čekací stání pro plavidla.



Obr. 3 - Pohled na dolní rejd plavební komory Vnorovy II

2.3. Rekreační plavba na Baťově kanálu

V posledních letech nejen Česká republika zaznamenala velký růst v oblasti segmentu malých plavidel. Proto i investice právě do tohoto odvětví se ukazují jako rentabilní. Zároveň plavba a s ní spojený turistický ruch představuje významný podíl do ekonomiky krajů.

V roce 2016 bylo v České republice zaregistrováno přibližně 16 500 malých plavidel. V průměru je to 1 plavidlo na 600 obyvatel. Do roku 2046 se dle vývoje předpokládá, že by v České republice tato hodnota mohla vzrůst na 1 malé plavidlo na 400 obyvatel. Významně narůstá i počet vydaných průkazů pro malá a rekreační plavidla. [1]

Vzrůstající poptávku po rekreační plavbě ukazuje i následující Tab. 1, kdy v roce 2018 bylo proplaveno o 416 lodí více než v roce 2017. V Tab. 1 je uvedeno průměrné proplavení každou plavební komorou na Baťově kanálu.

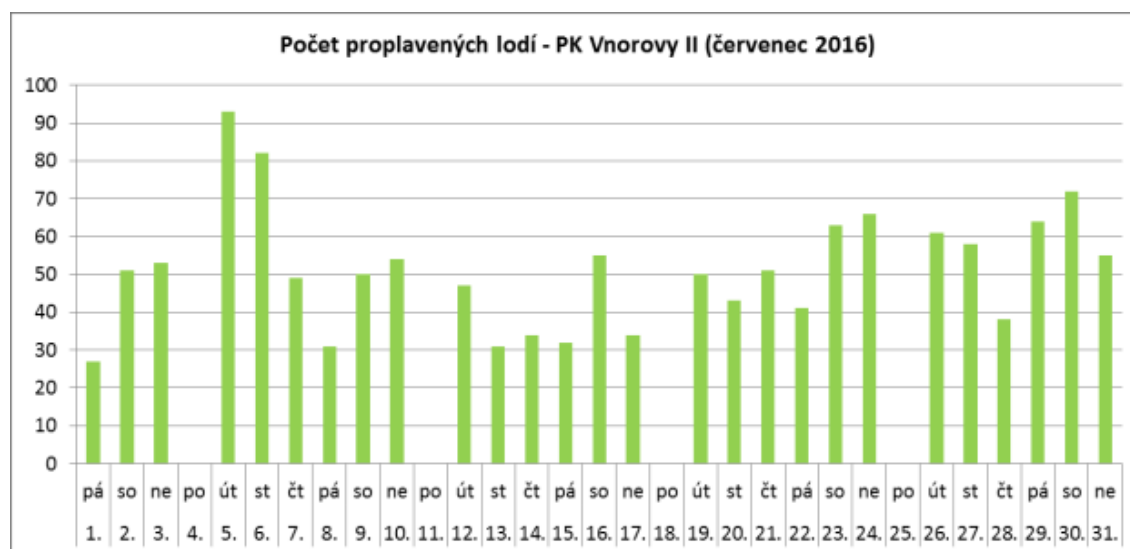
Tab. 1 - Průměrný počet proplavení plavebními komorami na Baťově kanálu [6]

2014		2015		2016		2017		2018	
Počet lodí	Počet osob	Počet lodí	Počet osob	Počet lodí	Počet osob	Počet lodí	Počet osob	Počet lodí	Počet osob
2 435	11 997	2 673	13 140	3 084	14 629	3 110	15 189	3 526	16 833

V posledních letech roste nejen počet návštěvníků, ale i délka jejich pobytu. Lidé na Baťově kanálu často tráví i týdenní dovolenou. V kategorii osobní lodní dopravy se na Baťově kanálu vyskytují pouze jednodenní plavby.

Ze statistik proplavení plavebními komorami lze odvodit, jako nejatraktivnější jižní část Baťova kanálu v úseku Skalica – Veselí nad Moravou. Na tomto úseku leží obě řešené plavební komory. Na nárůstu počtu lodí se v tomto úseku podílelo především vystavení přístavu Petrov v roce 2015.

V některých úsecích především v hlavní turistické sezóně je poptávka po proplavení tak enormní, že dochází k maximálnímu možnému využití plavebních komor i vyčerpání kapacit pro kotvení. Právě kapacita plavebních komor je jedním z nejvíce omezujících prvků dalšího rozvoje plavby na Baťově kanále. Následující Obr. 4 ukazuje počet proplavených lodí v roce 2016 v měsíci červenci na plavební komoře Vnorovy II.



Obr. 4 - Počet proplavení plavební komorou Vnorovy II v červenci 2016 [1]

Na rozdíl od řešení míst k zakotvení, je problém s propustností plavebních komor obtížně řešitelný. Největší problém s kapacitou plavebních komor nastává právě v jižní části Baťova kanálu, nejvíce u plavební komory Petrov, Vnorovy I a Vnorovy II, kde se hodnoty v letních měsících blíží k maximální možné kapacitě plavební komory. Propustnost plavební komory je dána rozměry a dobou proplavení. Doba proplavení se mimo jiné odvíjí od spádu, který se pomocí plavební komory překonává. Plavební komora Vnorovy I překonává spád 2,88 m, to je jeden z nejvyšších spádů komor na Baťově kanálu.

Na Baťově kanálu je nyní postaveno přibližně 20 přístavišť a přístavů, dalších 5 je postaveno na řece Moravě. Vzdálenost přístavišť je nyní přibližně 3-4 km. [1]

Na Obr. 5 je vyfocen přístav Petrov, který se v současnosti řadí k největším a nejmodernějším přístavům na Baťově kanále.

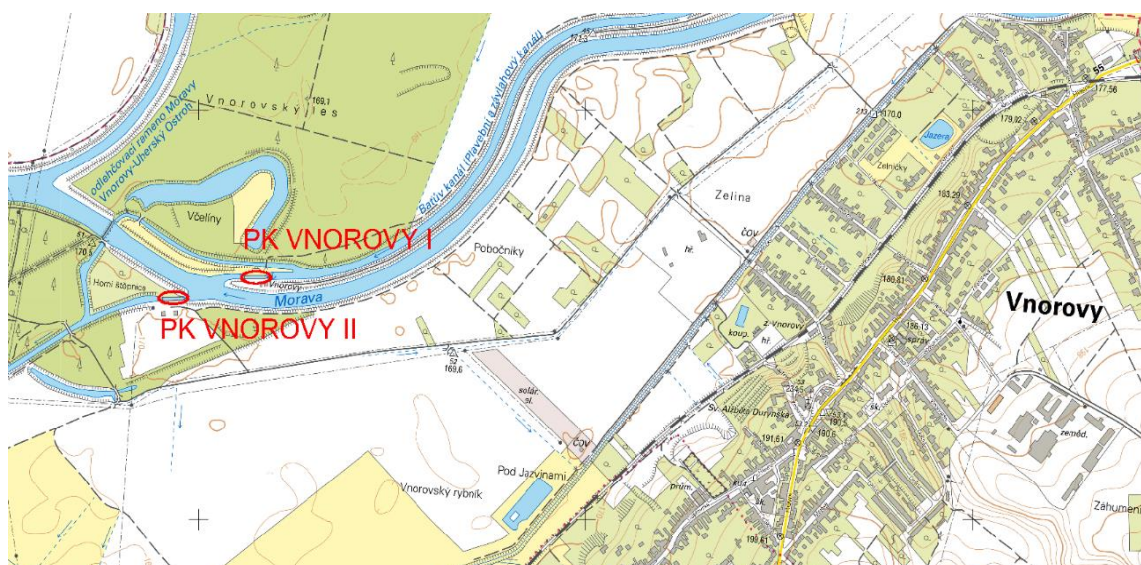


Obr. 5 – Přístav Petrov [7]

Přístav nabízí krátkodobé, střednědobé i dlouhodobé stání pro plavidla. Přístav je vybaven jeřábem. Pro návštěvníky jsou poskytovány služby, především se jedná o připojení na elektrickou energii, vodovod a nakládání s odpady. Přístav při mimořádných událostech, například při povodni, umožňuje ochranu plavidel.[7]

3. PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I A VNOROVY II

Obě řešené plavební komory se nachází v jižní části Baťova kanálu. Směrem proti toku se nachází plavební komora Veselí nad Moravou. Ve Veselí nad Moravou je vybudováno nápusťné stavidlo pro celou jižní část Baťova kanálu. Směrem po toku je postavena plavební komora Strážnice. Následující Obr. 6 ukazuje umístění zmíněných plavebních komor na Základní mapě České republiky.



Obr. 6 - Situace širších vztahů [8]

Mezi plavebními komorami Vnorovy I a Vnorovy II dochází ke křížení s korytem řeky Moravy. V horní i dolní části kanálového úseku Baťova kanálu se udržuje trvale vyšší hladina než v řece Moravě. Na Obr. 7 je na podkladu ortofotomapy znázorněna místní situace.



Obr. 7 - Situace s vyznačením důležitých prvků [9]

K dalšímu křížení Baťova kanálu dochází ve Strážnici. Plavební hladina je zde však udržována jezem Strážnice a při běžném plavebním provozu zůstávají vrata plavebních komor Strážnice I a Strážnice II otevřená.

Na řece Moravě v blízkosti obou komor je umístěn jez Vnorovy, kterým se reguluje výška hladiny v řece Moravě, ta je udržována přibližně na kótě 167,02 m n.m. Je zde tolerance ± 20 cm, jelikož obsluha jezu není schopna velkými tabulovými uzávěry udržovat hladinu na přesné kótě. V důsledku zanesení rejd je snaha držet hladinu spíše výše, aby nedocházelo k problémům při plavbě.

K zabezpečení množství vody v dolní části kanálu dochází před plavební komorou Vnorovy I k odklonění části toku pomocí otevřeného kanálu. Vedlejší rameno vede podél řeky Moravy až k jezu Vnorovy, kde je pomocí shybky převedeno pod jezem a za jezem je opět pomocí otevřeného kanálu napojeno zpět do kanálového úseku. Na Obr. 8 vidíme zmíněné odbočení kanálu před plavební komorou Vnorovy I.



Obr. 8 - Odbočení části toku

Na vedlejším rameni jsou umístěna tři stavidla vedle sebe. Pro zajištění potřeby vody je prostřední stavidlo vybaveno automatizovaným systémem zajišťujícím otevírání nebo zavírání. V případě potřeby se potom otevírají i vedlejší dvě stavidla.

Na Obr. 9 jsou patrná 3 stavidla vedle sebe, zajišťující plavební hladinu v jižní části kanálu.



Obr. 9 - Stavidla regulující hladinu v jižní části kanálu

Dříve zde byla provozována unikátní lodní lanovka, sloužící k přetahování lodí z jedné komory do druhé přes koryto řeky Moravy. K přetahování mohlo docházet i za vyšších vodních stavů. Na obou březích se v dnešní době nachází pouze torzo této technické památky. V budoucnosti by v těchto místech měl vzniknout tzv. transbordér, kombinující most a lanovku. Bude tak umožněna přeprava z jednoho břehu řeky Moravy na druhý bez objížďky, kterou je v současnosti nutno absolvovat. Torzo lanovky je viditelné na Obr. 10.



Obr. 10 - Torzo bývalé lodní lanovky

3.1. Plavební komora Vnorovy I

Plavební komora Vnorovy I leží v říčním kilometru 13,23 vodní cesty. Rozdíl plavebních hladin je 2,88 m. U této plavební komory je pro plnění využito krátkého obtoku na pravém břehu. Krátký obtok je vybaven válcovým stavidlem a česlemi. Vtokové okno je umístěno ve stěně plavební komory na pravém břehu. Průměr plnicího potrubí je 1,0 m. Přístup k uzavěři je přímo z pravého břehu. Na Obr. 11 je vidět pohled na horní vrata plavební komory.



Obr. 11 - Pohled na horní vrata plavební komory Vnorovy I

Obtok je vyústěn v uklidňovací komoře pod záporníkem horních vzpěrných vrat pod úrovní nejnižší hladiny vody v komoře. Komora je plněna vtokovými okny pod záporníkem. Na Obr. 12 je vyfocen vtok do plnicího systému plavební komory.



Obr. 12 - Pohled na vtokové okno do obtoku [10]

V minulosti byla provedena automatizace plavební komory Vnorovy I. Ovládání jednotlivých částí plavební komory je umožněno pomocí přenosného ovladače. V případě poruchy je možno zařízení ovládat ručně v poloautomatickém režimu, případně v ručním nouzovém režimu. Komora je vybavena snímačem hladiny, který snímá stav hladiny v komoře, dolní a horní rejdě. Zároveň jsou snímány polohy pohyblivých částí plavební komory, především vrat a uzávěrů plnicího a prázdnícího systému. Pohled na dolní vrata je zobrazen na Obr. 13.



Obr. 13 - Pohled na dolní vrata z dolní rejdy

Stavitkové uzávěry jsou ovládané samostatnými hydromotory umístěnými na vrátních. Přístup k uzávěrům je zajištěn z lávky, která je součástí vzpěrných vrat. Plavební komora je vybavena protipovodňovými vraty v dolním ohlavi, dosahujícími do výšky ochranných hrází. Dolní vrata jsou vyobrazena na Obr. 14.



Obr. 14 - Dolní vrata plavební komory Vnorovy I

Protipovodňová vrata jsou pro ovládání vybavena cévovými tyčemi. Při modernizaci byla zachována možnost ručního ovládání protipovodňových vrat pomocí kliky.

Okolí plavební komory je přizpůsobeno pro rekreanty. Nachází se zde občerstvení, půjčovna lodí a v provozu je také soukromý přístav Vnorovy. V horní a dolní rejdě jsou umístěna návěstidla pro zabezpečení plynulého a bezpečného proplouvání plavidel přes plavební komoru. Na Obr. 15 je vyfocen pohled na plavební komoru Vnorovy II z dolní rejdy plavební komory Vnorovy I.



Obr. 15 - Pohled na plavební komoru Vnorovy II

3.2. Plavební komora Vnorovy II

Plavební komora Vnorovy II se nachází v říčním kilometru 12,99 vodní cesty. Rozdíl plavebních hladin je 0,88 m. U plavební komory Vnorovy II je pro plnění i prázdnění využito stavítek ve vzpěrných vratech. Stavítkové uzávěry jsou rovněž ovládány samostatnými hydromotory umístěnými na vrátních.

Na Obr. 16 je vyfocen pohled na horní vrata plavební komory Vnorovy II.



Obr. 16 - Horní vrata plavební komory Vnorovy II

Komora je vybavena další dvojicí vzpěrných vrat pro případ, kdy hladina v řece Moravě je výše než v kanále. V minulosti tak byla umožněna plavba i za vyšších stavů v řece Moravě. Dnes je plavba, při průtoku v měrném profilu Strážnice větším než 120 m^3 zastavena a vrata zajišťují protipovodňovou funkci. Veškeré ovládání plavební komory probíhá automaticky pomocí dálkového ovladače.

Na Obr. 17 je vyfocen pohled na dolní vrata z dolní rejdy, vidíme zde i světelnou signalizaci pro zabezpečení bezpečného proplavování.



Obr. 17 - Pohled na dolní vrata z dolní rejdy

Zajímavostí na této plavební komoře je otočný most, sloužící pro pojezd techniky na druhou stranu plavební komory. Na této straně díky řece Moravě, vyústění shybky a kanálu, vzniknul samostatný ostrov. Pomocí mostu je tak zajištěna údržba břehů, hrází a možnost dalších technických úprav. Na Obr. 18 je vyfocena plavební komora s otočným mostem.



Obr. 18 - Plavební komora Vnorovy II s otočným mostem

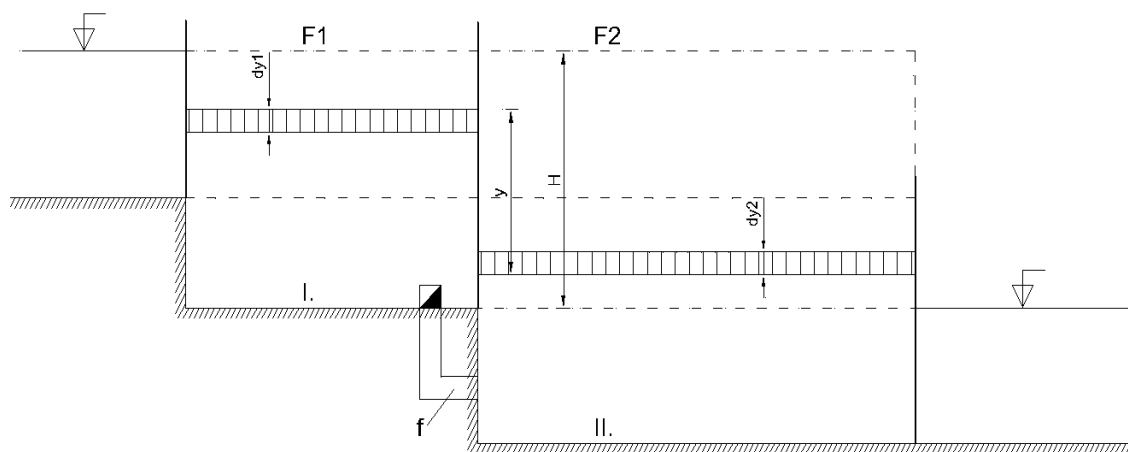
Součástí přílohy 1-5 jsou výkresy obou plavebních komor. Tyto výkresy byly překresleny z původních výkresů plavebních komor předaných od Povodí Moravy s.p. Původní kóty byly uvedeny v Moravním výškovém systému. U plavebních komor, kde nebylo provedeno nové geodetické zaměření, jsou výškové údaje přepočteny do systému Balt p.v.

4. PLNĚNÍ A PRÁZDNĚNÍ PLAVEBNÍ KOMORY

4.1. Doba plnění (prázdnění) plavební komory

Pro další výpočty bylo u plavebních komor třeba určit charakteristické hodnoty při plnění, případně prázdnění plavebních komor. Při výpočtu doby plnění (prázdnění) se uvažuje s tím, že se jedná o výtok kapaliny otvorem, případně krátkým potrubím z jedné nádoby do druhé při proměnném spádu. Pro výpočet je důležité rozlišit, zda je zaústění plnicího otvoru pod nejnižší hladinou vody v komoře, nebo naopak nad nejnižší hladinou vody v komoře. Vztít v úvahu je třeba také způsob manipulace s plnicími, případně prázdníci uzávěry. [11][12]

Výpočet vychází ze dvou nádrží o půdorysné ploše F_1 a F_2 . Na Obr. 19 vidíme schéma pro výpočet plnění (prázdnění) plavební komory.



Obr. 19 - Schéma pro výpočet plnění a prázdnění plavebních komor [11]

kde: H – počáteční spád (rozdíl hladin), y – okamžitý spád v čase t od začátku plnění (prázdnění), $dy_2(dy_1)$ – stoupnutí (klesnutí) hladiny za časový interval dt , μ_s – průměrná hodnota součinitele plnění (prázdnění), f – plocha průtočného profilu obtoku

Pro plnění (prázdnění) plavebních komor s výtokem pod počáteční hladinu vody v komoře můžeme pro elementární objem vody dV , který proteče obtokem za časový interval dt vyjádřit dvě rovnice:

rovnici dynamickou

$$dV = \mu_s f \sqrt{2gy} dt \quad (4.1)$$

a rovnici kontinuity

$$dV = F \cdot dy \rightarrow dV = F_1 dy_1 = F_2 dy_2 \quad (4.2)$$

Po úpravě dostaneme rovnici ve tvaru:

$$dt = -\frac{F_1 F_2}{F_1 + F_2} \frac{1}{\mu_s f \sqrt{2g}} \frac{dy}{\sqrt{y}} \quad (4.3)$$

V případě okamžitého otevření uzávěrů dostaneme rovnici pro celkovou dobu vzájemného vyrovnání hladiny v obou komorách:

$$T_0 = \int_0^{T_0} dt = -\frac{1}{\mu_s f \sqrt{2g}} \frac{F_1 F_2}{F_1 + F_2} \int_H^0 \frac{dy}{\sqrt{y}} \quad (4.4)$$

Pro případ, kdy má plavební komora svislé stěny a F_1 a F_2 je konstantní dostáváme vzorec:

$$T_0 = \frac{2F_1 F_2 \sqrt{H}}{(F_1 + F_2) \mu_s f \sqrt{2g}} \quad (4.5)$$

Pro výpočet, kdy jedna nádrž představuje velkou zdrž a druhá plavební komoru se vzorec zjednoduší na tvar:

$$T_0 = \frac{2F \sqrt{H}}{\mu_s f \sqrt{2g}} \quad (4.6)$$

Při lineárním otevírání uzávěrů, kdy doba otevírání uzávěru trvá t_z sekund, se doba naplnění (vyprázdnění) plavební komory skládá ze dvou částí:

$$T = \frac{t_z}{2} + \frac{2F_1 F_2 \sqrt{H}}{(F_1 + F_2) \mu_s f \sqrt{2g}} \quad (4.7)$$

Tento vzorec lze využít i pro případ plavební komory a její úsporné nádrže. Udává čas potřebný pro vyrovnání hladin.

Když jedna nádrž představuje velkou zdrž a druhá plavební komoru se vzorec zjednoduší na tvar:

$$T = \frac{t_z}{2} + \frac{2F\sqrt{H}}{\mu_s f \sqrt{2g}} \quad (4.8)$$

Jestliže se uzávěry obtoků otevírají nelineárně, nebo pokud profil obtoku v místě uzávěru není obdélníkový, nelze uvažovat průměrnou plochu obtoku a výpočet je prováděn diferenční metodou s využitím následující rovnice:

$$\Delta t = t_i - t_{i-1} = \frac{2F_1 F_2 [\sqrt{H_{i-1}} - \sqrt{H_i}]}{(F_1 + F_2) \mu_s f_t \sqrt{2g}} \quad (4.9)$$

kde: f_t – průměrná plocha průtočného profilu obtoku v daném časovém intervalu.

Pro případ jedné plavební komory a přilehlé zdrže má rovnice zjednodušený tvar:

$$\Delta t = t_i - t_{i-1} = \frac{2F[\sqrt{H_{i-1}} - \sqrt{H_i}]}{\mu_s f_t \sqrt{2g}} \quad (4.10)$$

Součinitel plnění udává poměr mezi skutečným a teoretickým průtokem. Vyjadřuje souhrn hydraulických ztrát v celém plnicím (prázdnícím) systému. Hodnota součinitele se v důsledku neustáleného pohybu vody mění, ve výpočtu se však uvažuje konstantní hodnota, která je rovna jeho průměrné hodnotě. [11][12]

4.2. Průběh plnění (prázdnění) plavební komory

Průběh stoupání (klesání) hladiny při plnění (prázdnění) plavební komory je vhodnější řešit diferenční metodou která je společná pro lineární i nelineární otevírání uzávěrů.

Pro výpočet komor o půdorysných plochách F_1 a F_2 se okamžitý spád určí z rovnice 4.9:

$$H_i = \left(\sqrt{H_{i-1}} - \frac{(F_1 + F_2)\mu_s f_t \sqrt{2g\Delta t}}{2F_1 F_2} \right)^2 \quad (4.11)$$

Pro výpočet plnění (prázdnění) jednoduché plavební komory s dostatečně velkou horní i dolní zdrží se použije rovnice vyjádřena ze vzorce 4.10:

$$H_i = \left(\sqrt{H_{i-1}} - \frac{\mu_s f_t \sqrt{2g\Delta t}}{2F} \right)^2 \quad (4.12)$$

Odečtením hodnoty H_i od počátečního spádu zjistíme průběh stoupání (klesání) hladiny v komoře:

$$h_i = H - H_i \quad (4.13)$$

Průběh přítoku vody do komory (výtoku z komory) se určí ze vztahu:

$$Q_i = \mu_s f_t \sqrt{2gH_t} \quad (4.14)$$

Do této rovnice se za H_t a f_t dosazují průměrné hodnoty v jednotlivých intervalech.

4.3. Síly působící na lodě v plavební komoře

V plavební komoře působí na plavidla při plnění a prázdnění horizontální a vertikální síly. Při návrhu plnicího (prázdnícího) systému se jako základní kritérium uvažuje velikost horizontálních sil, které působí na proplavovaná plavidla rovnoběžně s osou komory. Tyto síly jsou vyvolány prouděním vody v komoře, měnícím se sklonem hladiny, dynamickými účinky vody a dalšími hydraulickými jevy. Proti nepříznivému účinku těchto sil je třeba zamezit vodorovnému pohybu lodí v plavební komoře pomocí uvázání lodě úvaznými lany k úvaznému zařízení, kterými je plavební komora vybavena. Při návrhu je třeba zjistit maximální přípustnou sílu, kterou je lano schopno přenést bez přetržení. Lodě jsou dle výtlaku lodě vybaveny příslušnými lany určité nosnosti.[11][12]

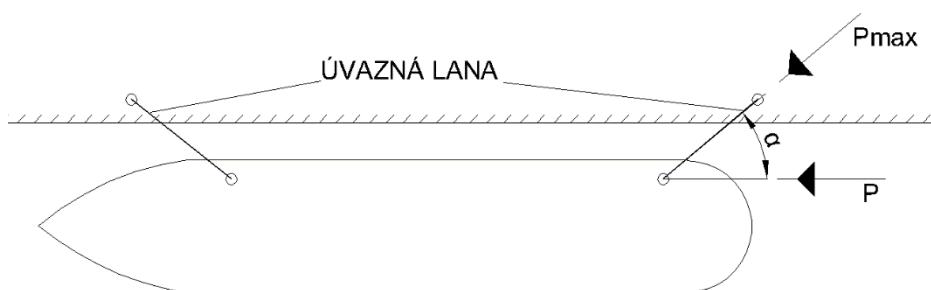
Při plnění (prázdnění) mění složka horizontální síly svůj směr, proto se loď musí vyvázat na obou koncích. Každé lano však musí přenést maximální působící sílu. Jelikož se často lano napíná pouze ručně, vzniká zde určitý průhyb, a to zapříčiní vznik setrvačné síly, která je větší než síla původní. [11]

Uvažuje se až 35% původní síly, proto se hodnota P' vypočítá dle vzorce:

$$P' = 1.35P \quad (4.15)$$

Vlivem úhlu, který loď svírá s osou plavební komory je tah v úvazném laně P_{\max} větší než maximální podélná síla P' . Tento úhel se uvažuje $20^\circ - 40^\circ$. [12]

Na Obr. 20 je zobrazeno schéma uvázané lodě a směr působení sil.



Obr. 20 - Schéma znázorňující síly na uvázané plavidlo [12]

Maximální výsledný tah v úvazném laně se pro 40° vypočítá dle rovnice:

$$P_{\max} = \frac{P'}{\cos \alpha} = \frac{P'}{\cos 40^\circ} = \frac{1.35P}{0.77} = 1.75P \quad (4.16)$$

Při posouzení bezpečnosti proplavované lodě je požadováno, aby maximální hodnota výsledného tahu v úvazném laně P_{\max} byla menší než dovolená hodnota R_{dov} .

R_{dov} můžeme vypočítat např. dle vzorce Michaljev 1:

$$R_{\text{dov}} = \frac{W^{\frac{3}{5}}}{20} \quad (4.17)$$

kde: W – výtlač proplavovaného plavidla.

Při výpočtu je uvažováno, že podélná síla, která působí na plavidlo se skládá ze tří složek:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (4.18)$$

kde: P_1 – složka vyvolána proudovým odporem plavidla. P_2 – složka vyvolána podélným sklonem vodní hladiny v komoře, P_3 – složka vyvolána vlněním vodní hladiny v komoře, při změně průtoků při plnění(prázdňení).

Největší podélná síla působí při přítoku vody do komory (výtoku vody z komory), který je soustředěn na jednom konci plavební komory u jedné jejích vrat. Ve skutečnosti je to právě přímé plnění a prázdnění vraty, nebo krátkými obtoky, případně podzáporníkové plnění plavební komory. [11]

Složka podélné síly P_1 představuje odpor lodě stojící v proudu protékajícím plavební komorou při plnění (prázdnění). Skládá se ze dvou členů, první je odpor třením proudící vody o boky a dno proplavovaného plavidla a druhý člen náleží tvarovému odporu plavidla. Směr složky P_1 je shodný se směrem proudění vody v plavební komoře při plnění (prázdnění) a v průběhu nemění svůj směr. [11]

Složka podélné síly P_2 , která je vyvolána podélným sklonem hladiny. Ten vzniká v důsledku změny kinetické energie na potenciální. Při plnění plavební komory je hladina vody na konci komory vyšší než na jejím začátku. Bez usměrňovačů proudu umístěných na začátku plavební komory, může vzniknout na začátku plavební komory i vodní skok. Tato složka podélné síly působí proti směru proudění vody.[11]

Složky P_1 a P_2 zastupují přibližně 15 – 20% z celkové podélné síly P . Navíc působí proti sobě a částečně se tak vyruší. Ve výpočtu maximální síly P_{\max} se tak často zanedbávají.[11]

Složka P_3 je vyvolána vlněním vody v komoře způsobeným změnou průtoku na jednom konci plavební komory. Při každé změně průtoku se vytvoří vlna pohybující se od konce plavební komory, kde je umístěno plnicí (prázdnicí) zařízení směrem ke druhému konci. Na tomto konci se vlna odrazí a postupuje zpět plavební komorou. Vlna je deformována proplavovaným plavidlem, částečně tak vlnu odrazí zpět a částečně vlna postupuje dále podél plavidla. V případě, že se uzávěry plnicích otvorů otevírají rovnoměrně, přítok vody se vyjádří jako řada elementárních změn průtoků dQ . Každá tato změna vyvolá plnicí vlnu.[11]

Spojením jednotlivých elementárních vln se vytvoří vlna, která má jednotný podélný sklon i :

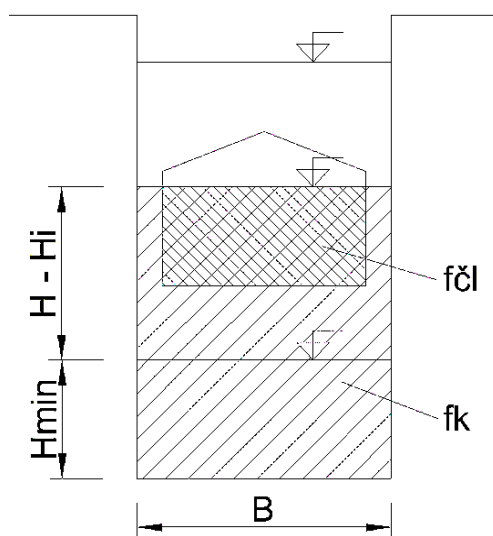
$$i = \frac{1}{gf_k} \frac{dQ}{dt} \quad (4.19)$$

Rovnice výpočtu sklonu i' vlny podél boků proplavovaného plavidla:

$$i' = \frac{1}{g(f_k - f_{\text{čl}})} \frac{dQ}{dt} \quad (4.20)$$

kde: f_k – příčná plocha vodní náplně v komoře, $f_{\text{čl}}$ – příčná plocha ponořeného člunu v profilu hlavního žebra, dQ/dt – změna průtoku v čase.

Vzorec pro výpočet příčné plochy vodní náplně a ponořené části plavidla vychází ze schématu na Obr. 21.



Obr. 21 - Schéma pro výpočet příčných ploch [12]

Příčná plocha vodní náplně v komoře se vypočítá dle rovnice:

$$f_k = B[H_{\min} + (H - H_i)] \quad (4.21)$$

kde: B – šířka komory, H_{\min} – minimální hloubka vody v komoře, H – rozdíl hladin, H_i – okamžitý rozdíl hladin.

Dle schématu na Obr. 21 je patrná i příčná plocha ponořeného člunu $f_{\text{čl}}$ a vypočítá se jako součin šířky a ponoru plavidla.

Složka P3 je nejnepříznivější při plnění plavební komory a vypočítá se jako součin výtlačku lodě a sklonu i' hladiny, maximální hodnotu této síly získáme dosazením maximální hodnoty i'_{max} :

$$P_{3max} = W \cdot i'_{max} \rightarrow P_{3max} = \frac{W}{g(f_k - f_{\check{c}l})} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{max} \quad (4.22)$$

Vztah pro maximální hodnotu změny průtoku plyne z rovnice:

$$\left(\frac{dQ}{dt} \right)_{max} \cong \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)_{max} = \left(\frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta t} \right)_{max} \quad (.23)$$

Takto vypočtená hodnota maximální síly v úvazných lanech se porovná s maximálně dovoleným tahem v úvazném laně.

Mezinárodní plavební asociace PIANC určuje pro rekreační plavidla maximální povolený podélný sklon hladiny při plnění plavební komory s pevnými úvaznými prvky 3 ‰.

5. VÝPOČET DOBY PLNĚNÍ A PRÁZDNĚNÍ PLAVEBNÍCH KOMOR

Pro další výpočty bylo třeba posoudit stávající systém plnění a prázdnění plavební komory. Podkladem pro výpočet plnění a prázdnění plavebních komor byly informace o hodnotách plavebních hladin, ty byly převzaty z manipulačního řádu pro tuto vodní cestu.

Vodní cesta je zařazena do 0. kategorie dle vyhlášky č. 222/1995 Sb., která definuje charakteristiku plavidla pro tuto třídu. Charakteristiky plavidla jsou uvedeny v následující Tab. 2.

Tab. 2 - Charakteristiky plavidla pro vodní cestu třídy 0 [13]

Druh cesty	Třída cesty	Charakteristika plavidla		
		délka	šířka	ponor
Regionálního významu	0	20	5	1,20

Pro toto typové plavidlo se udává maximální výtlak 120 t.

Z informací od Povodí Moravy a odvozením z Marketingové analýzy Baťova kanálu byla zjištěna přibližná doba plnění plavební komory, rozměry uzávěrů a délka trvání jejich otevírání. Z těchto údajů byl poté určen součinitel plnění (prázdnění) a proveden výpočet dle vzorců z kapitoly 4. Plocha plavební komory byla určena přesným odečtením z výkresů.

Plavební komora Vnorovy I Vnorovy II byla postavena s mírně zešíkmenými bočními zdmi. Při výpočtech však pro zjednodušení bylo uvažováno se vzorci pro zdi svislé, hodnota plochy a šířek plavebních komor byla uvažována jako průměrná mezi maximální a minimální hladinou.

5.1. Plavební komora Vnorovy I

5.1.1. Plnění plavební komory Vnorovy I

Plavební komora Vnorovy I je plněna jednostranným obtokem zaústěným pod záporníkem horních vrat na pravé straně. Vtokové obdélníkové okno do obtoku je umístěno přibližně 30 cm nad dnem, má rozměry 140x120 cm. Na vtoku jsou umístěny česle, které tento otvor přibližně o 10 cm z každé strany zmenšují. Samotné plnění probíhá pomocí zvedání válcového stavidla. Uzávěr je tvořen hradicím tělesem ve tvaru

svislého válce, průměr válce je přibližně stejný s průměrem kruhového vtoku do obtoku. Při zdvihání se po celém obvodu vytvoří štěrbina, kterou voda proudí do plnicího systému. Součástí uzávěru jsou tři svislé kolejnice, po kterých při zvedání válcové stavidlo pojíždí. Toto stavidlo se lineárně zvedá 30 s do výšky 0,5 m. Samotné potrubí má průměr 1,0 m. Výtok tohoto potrubí je vyústěn pod nejnižší hladinu vody v komoře. Obtok je nejdříve zaústěn do uklidňovací komory a plnění dále probíhá pomocí 4 vtokových oken. Při vyšší hladině vody dojde k zatopení i dvou menších otvorů. Na začátku plnění slouží tato okna k odvodu vzduchu. V počáteční fázi výpočtu byla nejdříve plocha vtoku rovna součinu výšky zdvihu a obvodu stavidla, v momentě, kdy tato plocha začala převyšovat plochu potrubí, bylo uvažováno s plochou potrubí.

V následující Tab. 3 jsou uvedeny vstupní údaje pro výpočet plnění plavební komory Vnorovy I.

Tab. 3 - Vstupní údaje pro výpočet plnění plavební komory Vnorovy I

H₁	167,02	m n.m	dolní plavební hladina
H₂	169,90	m n.m	horní plavební hladina
H₀	2,88	m	počáteční spád
H_{min}	2,42	m	minimální hloubka vody v komoře
F	285,06	m ²	plocha plavební komory
t_z	30,00	s	dobu otevírání uzávěru
μ_s	0,45	-	součinitel ztrát
d	1,00	m	průměr kruhového obtoku
f	0,79	m ²	maximální plocha plnicího profilu
g	9,81	m/s ²	gravitační zrychlení
f_{cl}	6,00	m ²	příčná plocha ponořeného člunu v profilu hlavního žebra
W	120,00	t	výtlak lodě

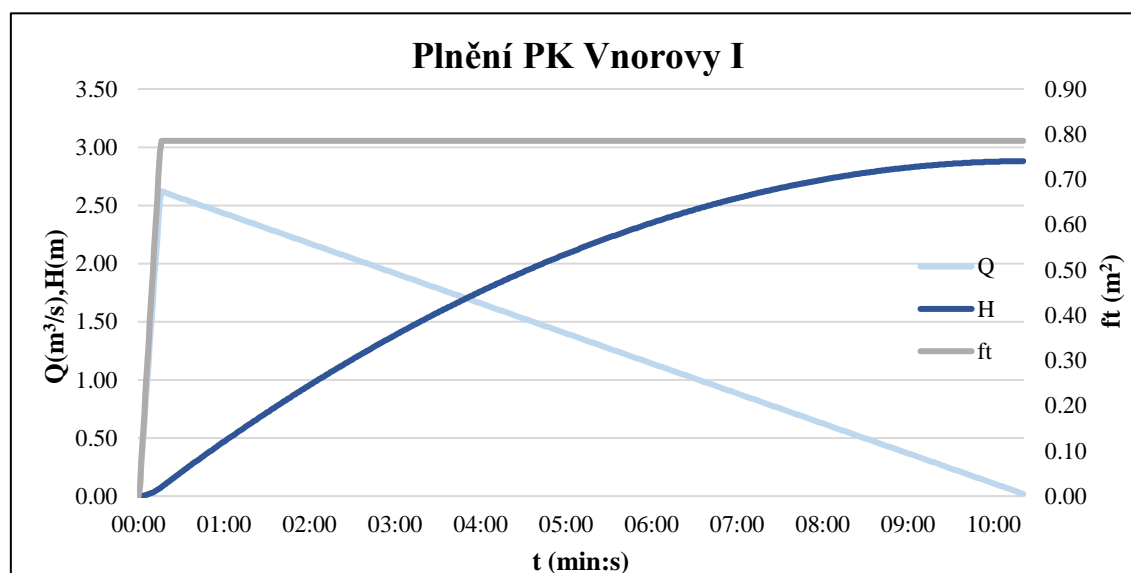
Aby doba plnění dle výpočtu trvala reálnou známou dobu, byla vypočtena hodnota součinitele plnění 0,45, tedy poměrně malá. Tento součinitel ukazuje, že v systému nastávají větší hydraulické ztráty, to může být zapříčiněno většími ztrátami na vtok u válcového stavidla nebo změnou směru v obtoku.

V Tab. 4 jsou uvedeny výsledné hodnoty pro plnění plavební komory. Pro další fáze výpočtu je důležitá maximální hodnota přítoku vody do komory, výška hladiny a rychlost ve vtokovém profilu při tomto průtoku.

Tab. 4 - Výsledné hodnoty při plnění plavební komory Vnorovy I

T	560,00	s	doba plnění plavební komory
	10,55	min	
Q_{max}	2,62	m ³ /s	maximální přítok vody do komory
v_{max}	3,34	m/s	maximální rychlost
v	0,55	m/min	maximální rychlost stoupání hladiny
	0,01	m/s	
i_{max}	2,14	‰	maximální sklon hladiny
i_{dov}	3,00	‰	maximální dovolený sklon hladiny
P_{max}	4,50	kN	maximální síla namáhající lano
R_{dov}	8,67	kN	mezí pevnost lana
P_{max}	<	R_{dov}	podmínky
i_{max}	<	i_{dov}	

Na Obr. 22 je vynesena průběh průtočné plochy obtoku, přítoku vody do komory a průběh polohy hladiny v závislosti na čase při plnění plavební komory Vnorovy I.



Obr. 22 - Průběh plnění plavební komory Vnorovy I

5.1.2. Prázdňení plavební komory Vnorovy I

Pro prázdňení plavební komory je využito dvojice stavítek ve vzpěrných vratech o rozměru 70x50 cm. I v tomto případě se jedná o lineární otevírání uzávěru. Doba otevírání stavítek je 30 s.

V Tab. 5 jsou uvedeny vstupní hodnoty pro výpočet.

Tab. 5 - Vstupní údaje pro výpočet prázdnění plavební komory Vnorovy I

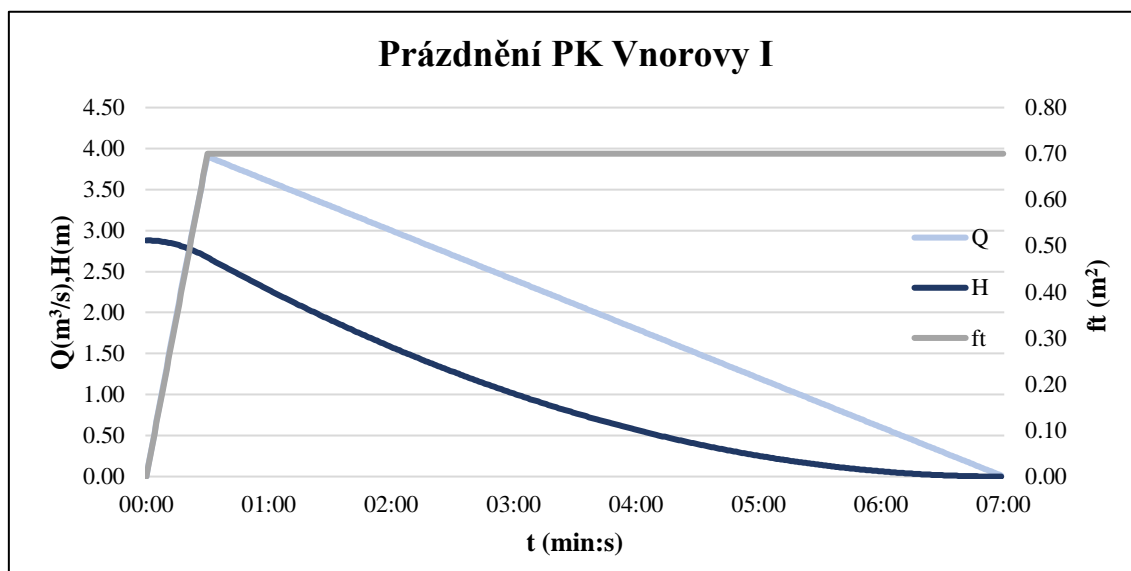
H₁	167,02	m n.m	dolní plavební hladina
H₂	169,90	m n.m	horní plavební hladina
H₀	2,88	m	počáteční spád
H_{min}	5,30	m	minimální hloubka vody v komoře
F	285,06	m ²	plocha plavební komory
t_z	30,00	s	doba otevírání uzávěru
μ_s	0,76	-	součinitel ztrát
f	0,70	m ²	maximální plocha odtokového profilu
g	9,81	m/s ²	gravitační zrychlení
f_{cl}	6,00	m ²	příčná plocha ponořeného člunu v profilu hlavního žebra
W	120,00	t	výtlačk lodě

V následující Tab. 6 jsou uvedeny výstupní hodnoty prázdnění plavební komory Vnorovy II. Maximální síla namáhající lano vychází menší než při prázdnění, protože na začátku prázdnění je vyšší počáteční hladina v komoře.

Tab. 6 - Výsledné hodnoty prázdnění plavební komory Vnorovy I

T	420,00	s	doba prázdnění plavební komory
	7,00	min	
Q_{max}	3,90	m ³ /s	maximální odtok vody z komory
v	0,82	m/min	maximální rychlost klesání hladiny
	0,01	m/s	
i_{max}	0,54	‰	maximální sklon hladiny
i_{dov}	3,00	‰	maximální dovolený sklon hladiny
P_{max}	1,13	kN	maximální síla namáhající lano
R_{dov}	8,67	kN	mezní pevnost lana
P_{max}	<	R_{dov}	podmínky
i_{max}	<	i_{dov}	

Na Obr. 23 je vynesen průběh průtočné plochy obtoku, přítoku vody do komory a průběh polohy hladiny v závislosti na čase při prázdnění plavební komory Vnorovy I.



Obr. 23 - Průběh prázdnění plavební komory Vnorovy I

5.2. Plavební komora Vnorovy II

5.2.1. Plnění plavební komory Vnorovy II

Plavební komora Vnorovy II je plněna přímo obdélníkovými otvory rozměru 50x70 cm ve vratech. Na vratech jsou umístěna dvě stavítka, která se lineárně otevírají po dobu 30 s. Plavební komora Vnorovy II disponuje výrazně menším spádem, než plavební komora Vnorovy I. V Tab. 7 jsou uvedeny vstupní údaje pro výpočet plavební komory Vnorovy II.

Tab. 7 - Vstupní údaje pro výpočet plnění plavební komory Vnorovy II

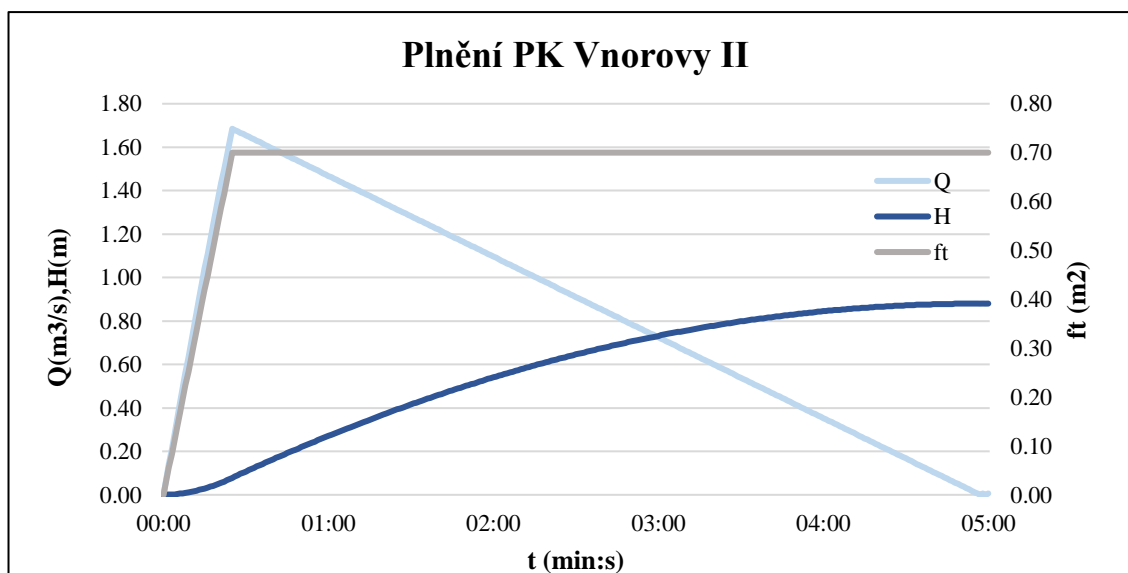
H₁	167,02	m n.m	dolní plavební hladina
H₂	167,90	m n.m	horní plavební hladina
H₀	0,88	m	počáteční spád
H_{min}	1,91	m	minimální hloubka vody v komoře
F	285,87	m ²	plocha plavební komory
t_z	30,00	s	doba otevírání uzávěru
μ_s	0,64	-	součinitel ztrát
f	0,70	m ²	maximální plocha plnicího profilu
g	9,81	m/s ²	gravitační zrychlení
f_{el}	6,00	m ²	příčná plocha ponořeného člunu v profilu hlavního žebra
W	120,00	t	výtlač lodě

V následující Tab. 8 jsou uvedeny výstupní hodnoty prázdnění plavební komory Vnorovy II.

Tab. 8 - Výsledné hodnoty plnění plavební komory Vnorovy II

T	300,00	s	doba plnění plavební komory
	5,00	min	
Q_{max}	1,68	m ³ /s	maximální přítok vody do komory
v	0,35	m/min	maximální rychlost stoupání hladiny
	0,01	m/s	
i_{max}	1,53	‰	maximální sklon hladiny
i_{dov}	3,00	‰	maximální dovolený sklon hladiny
P_{max}	3,21	kN	maximální síla namáhající lano
R_{dov}	8,67	kN	mezní pevnost lana
P_{max}	<	R_{dov}	podmínky
i_{max}	<	i_{dov}	

Na Obr. 24 je vynesena průběh průtočné plochy obtoku, přítoku vody do komory a průběh polohy hladiny v závislosti na čase při plnění plavební komory Vnorovy II.



Obr. 24 - Průběh plnění plavební komory Vnorovy II

5.2.2. Prázdnění plavební komory Vnorovy II

Plavební komora Vnorovy II je prázdněna otvory ve vratech stejných rozměrů, jako při plnění. Rovněž doba otevírání stavítek je stejná.

V následující Tab. 9 jsou uvedeny vstupní hodnoty pro výpočet prázdnění plavební komory Vnorovy II.

Tab. 9 - Vstupní údaje pro výpočet prázdnění plavební komory Vnorovy II

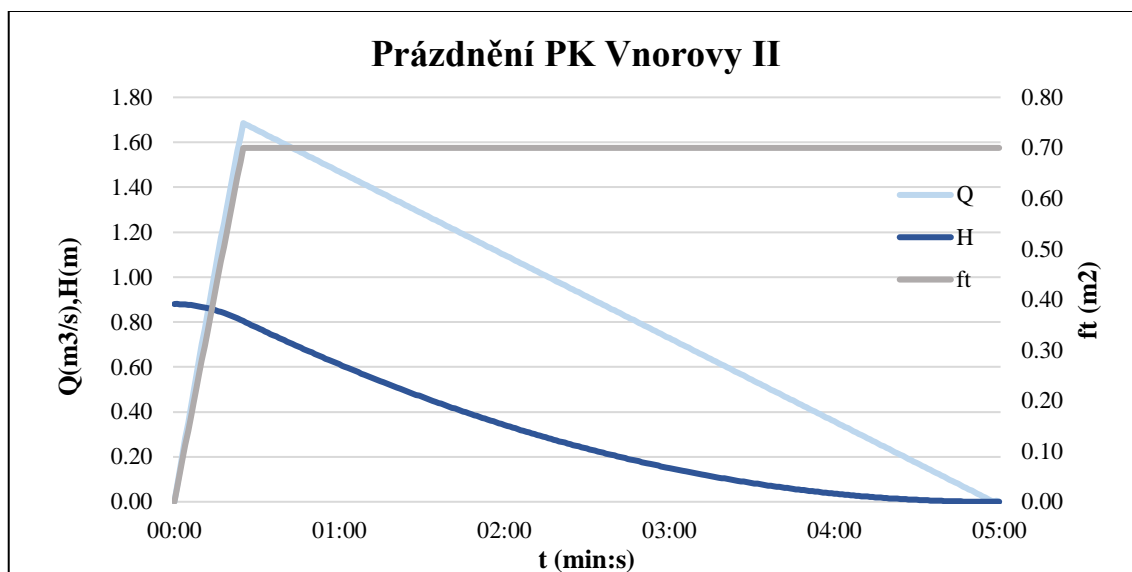
H₁	167,02	m n.m	dolní plavební hladina
H₂	169,90	m n.m	horní plavební hladina
H₀	0,88	m	počáteční spád
H_{min}	2,89	m	minimální hloubka vody v komoře
F	285,87	m ²	plocha plavební komory
t_z	30,00	s	dobu otevírání uzávěru
μ_s	0,64	-	součinitel ztrát
f	0,70	m ²	maximální plocha odtoku
g	9,81	m/s ²	gravitační zrychlení
f_{chl}	6,00	m ²	příčná plocha ponořeného člunu v profilu hlavního žebra
W	120,00	t	výtlačk lodě

V Tab. 10 jsou uvedeny výsledné hodnoty při prázdnění plavební komory Vnorovy II.

Tab. 10 - Výsledné hodnoty prázdnění plavební komory Vnorovy II

T	300,00	s	dobu prázdnění plavební komory
	5,00	min	
Q_{max}	1,69	m ³ /s	maximální odtok vody z komory
v	0,35	m/min	maximální rychlost klesání hladiny
	0,01	m/s	
i_{max}	0,71	‰	maximální sklon hladiny
i_{dov}	3,00	‰	maximální dovolený sklon hladiny
P_{max}	1,48	kN	maximální síla namáhající lano
R_{dov}	8,67	kN	mezní pevnost lana
P_{max}	<	R_{dov}	podmínky
i_{max}	<	i_{dov}	

Na následujícím Obr. 25 je vynesena průběh průtočné plochy obtoku, přítoku vody do komory a průběh polohy hladiny v závislosti na čase při prázdnění plavební komory Vnorovy II.



Obr. 25 - Průběh prázdnění plavební komory Vnorovy II

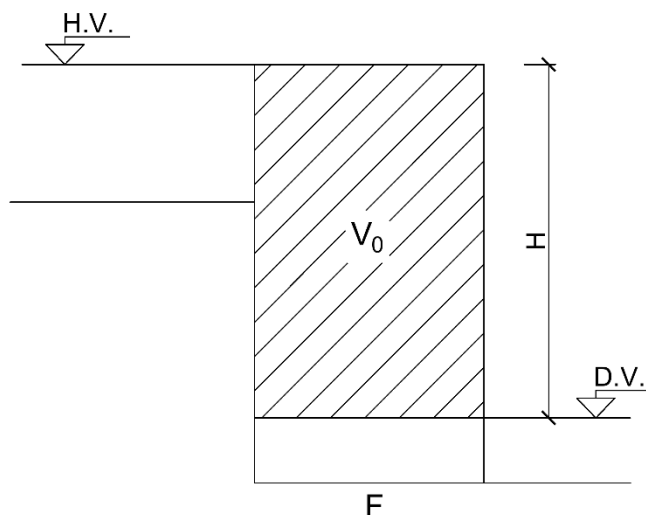
6. POTŘEBA VODY

V řešeném úseku dochází zejména v období sucha k nedostatku vody. Celý poměrně dlouhý jižní úsek Baťova kanálu je zásoben vodou od náпустného stavidla ve Veselí nad Moravou. Při křížení s řekou Moravou dochází k vypouštění vody potřebné pro proplavení zpět do řeky a voda tak v kanálu ubývá. V posledních letech byly zaznamenány poměrně malé průtoky na řece Moravě i na řece Veličce, která napájí další kanálové úseky. Problém v jižní části úseku byl zaznamenán například v roce 2018, v srpnu a září, kdy bylo pro nedostatek vody částečně omezeno proplavování plavebními komorami. Pro zajištění proplavování se předem stanovil čas a komora se zaplnila co největším počtem lodí.

Dle manipulačního řádu může být při extrémně nízkých průtocích blízkých hodnotám minimálního zůstatkového průtoku v řece omezeno napouštění vody do kanálového úseku vodní cesty.[5]

6.1. Potřeba vody k proplavení u plavební komory

Při plnění jednoduché jednostupňové komory je třeba objem vody, který je rovný součinu plochy hladiny v komoře F a spádu komory H (rozdíl hladin horní a dolní vody). Tento výpočet vychází ze schématu na Obr. 26.



Obr. 26 - Schéma pro výpočet potřeby vody[11]

Výpočet je platný pro jednotlivé proplavení lodi a pro komory s bočními svislými zdmi:

$$V_0 = FH \quad (6.1)$$

Při proplavování se kromě objemu vody přemísťuje i objem výtlačku lodě W . Pro jednosměrné proplavování je nutný celý objem, dle směru proplavování zmenšený nebo zvětšený o výtlačk lodi W :

$$V_1 = FH \pm W \quad (6.2)$$

V případě, kdy se stejné lodě přepravují střídavě nahoru a dolu je k proplavování nutný menší objem:

$$V_2 = 0,5FH \quad (6.3)$$

Při soustavném obousměrném proplavování lodí je tedy objem potřebný k proplavení jedním směrem poloviční. V praxi však není možno zajistit pravidelné střídavé proplavování. [11]

Potřeba vody se uvažuje jako průměr mezi potřebou proplavovací vody pro jednotlivé proplavení a potřebou vody pro pravidelné střídavé proplavování v obou směrech:

$$V_3 = \frac{FH + 0,5 FH}{2} = 0,75FH \quad (6.4)$$

6.1.1. Potřeba vody – Plavební komora Vnorovy I

V následující Tab. 11 jsou uvedeny údaje pro výpočet potřeby vody k proplavení plavební komorou Vnorovy I a vypočtená potřeba vody. Potřeba vody byla vypočtena dle vzorců z kapitoly 6.1.

Tab. 11 - Parametry plavební komory a vypočtená potřeba vody pro proplavení

Parametry plavební komory Vnorovy I			
plocha hladiny v komoře F	285,06	m ²	
spád H	2,88	m	
Potřeba vody			
při jednotlivém osamoceném proplavování			
při proplavování z horní zdrže do dolní	V ₁	940,97	m ³
při proplavování z dolní zdrže do horní	V ₁	700,97	m ³
při soustavném obousměrném proplavování	V ₂	410,49	m ³
při nepravidelném provozu	V ₃	615,73	m ³

6.1.2. Potřeba vody – Plavební komora Vnorovy II

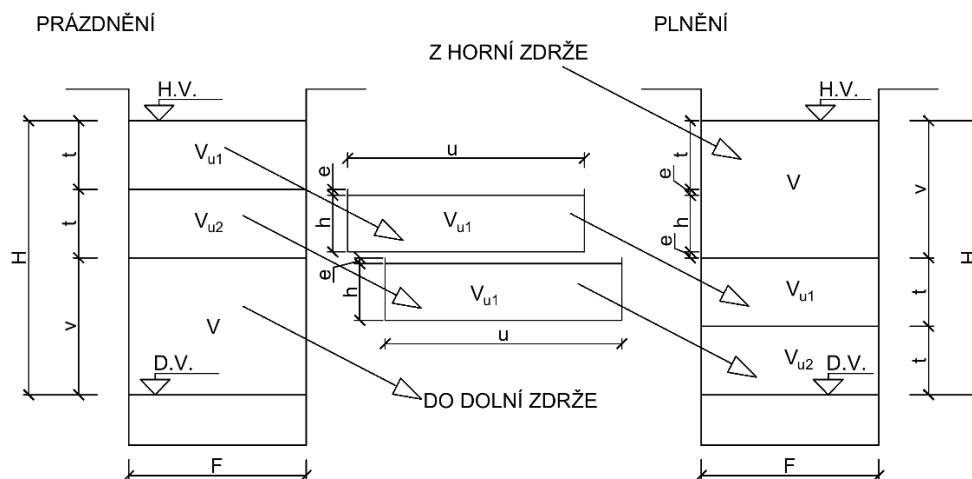
V následující Tab. 12 jsou uvedeny údaje pro výpočet potřeby vody k proplavení plavební komorou Vnorovy II a vypočtená potřeba vody. Potřeba vody byla vypočtena dle vzorců z kapitoly 6.1.

Tab. 12 - Parametry plavební komory a vypočtená potřeba vody pro proplavení

Parametry plavební komory Vnorovy II			
plocha hladiny v komoře F	285,87	m ²	
spád H	0,88	m	
Potřeba vody			
při jednotlivém osamoceném proplavování			
při proplavování z horní zdrže do dolní	V ₁	371,57	m ³
při proplavování z dolní zdrže do horní	V ₁	131,57	m ³
při soustavném obousměrném proplavování	V ₂	125,78	m ³
při nepravidelném provozu	V ₃	188,67	m ³

7. ÚSPORNÉ NÁDRŽE

Pro úsporu vody potřebné k proplavování je možno vybudovat v blízkosti plavební komory takzvané úsporné nádrže. Principem těchto nádrží je přepouštění části vody při proplavování do nádrže a následně její opětovné využití. Při prázdnění se určitý objem vypustí do sousedních úsporných nádrží, ze kterých se potom následně napouští při plnění plavební komory. Princip je znázorněn na následujícím schématu na Obr. 27.



Obr. 27 - Schéma pro výpočet úsporných nádrží [11]

Úsporné nádrže je možno umístit po jedné, nebo po obou stranách plavební komory. Lze je vybudovat jako zakryté nebo otevřené, vedle sebe nebo nad sebou. Při vhodném návrhu lze uspořit značnou část potřebné vody k proplavování. Při řešení je nutno dbát na správné výškové uspořádání nádrží. Nejčastějším řešením u úsporných nádrží je gravitační vedení, při tomto způsobu není možné uspořit celý objem vody nutný k proplavení. Při stejných plochách úsporných nádrží a plavební komory lze při počtu dvou úsporných nádrží uspořit přibližně 50 % vody potřebné k proplavování. [11][14]

Budují se především u průplavů, kde je častý nedostatek vody. Úsporné nádrže v České republice nejsou zatím nikde využívány, ale v projektu pro průplavní spojení Dunaj-Odra-Labe jsou navrženy šikmé úsporné nádrže u komor s velkým spádem.

V zahraničí jsou využity například v Německu na dvojité plavební komoře Hohenwarthe, ležící na průplavu Rýn-Herne. Každá nádrž má šířku 15,5 m a délku 167 m. Na každé straně jsou umístěny 3 úsporné nádrže, tímto systémem se dosáhne přibližně 60% úspory vody. [15]

Plavební komora Hohenwarthe je vyfocena na Obr. 28.



Obr. 28 - Plavební komora Hohenwarthe s úspornými nádržemi [15]

Dalším příkladem může být dvojice plavebních komor Sülfeld v Dolním Sasku v Německu na Středozemním průplavu. U jedné plavební komory tyto úsporné nádrže, které jsou umístěny po třech na každé straně, zachytí přibližně 60% vody potřebné pro proplavení. U druhé, u které je umístění nádrží terasovitě podél jedné strany se uspoří přibližně 50% vody (přibližně 13 700 m³ vody). [15]

Na Obr. 29 je vyfocena dvojice plavebních komor Sülfeld.



Obr. 29 - Plavební komora Sülfeld s úspornými nádržemi [15]

Tyto plavební komory jsou však velikostí a spádem výrazně vyšší, než je u komor na Baťově kanálu.

7.1. Návrh úsporných nádrží – potřeba a úspora vody

Při řešení navrhujeme počet úsporných nádrží ze vztahu:

$$k = n - 2 \quad (7.1)$$

kde: n – navrhnutý počet vrstev mezi mezními hladinami v komoře.

Poměr mezi plochou hladiny v úsporné nádrži a plochou hladiny v plavební komoře:

$$m = U/F \quad (7.2)$$

kde: U – plocha hladiny v úsporné nádrži, F – plocha hladiny v plavební komoře.

Při přepouštění vody platí vztah:

$$Ft = Uh \quad (7.3)$$

kde: t – výška jednotlivých vrstev vody v plavební komoře, h – hloubka vody v úsporných nádržích.

Ze vztahu 7.3 tedy pro výšku jedné vrstvy v komoře platí:

$$t = \frac{Uh}{F} \rightarrow t = mh \quad (7.4)$$

Ze schématu na Obr. 27 je patrné, že při prázdnění plavební komory zůstane v komoře vrstva vody, kterou je třeba vypustit do dolní zdrže, naopak při plnění se stejně vysoká vrstva musí dopustit z horní zdrže. Výšku této vrstvy určíme ze vztahu:

$$v = H - kt = t + h + 2e \quad (7.5)$$

Pro hloubku vody v nádržích potom platí:

$$h = \frac{H - 2e}{1 + m(1 + k)} \quad (7.6)$$

Pro zkrácení doby pro proplavování se při přepouštění nečeká na úplné vyrovnání hladin v nádržích a v komoře. Proto se uzávěry na obtocích uzavírají dříve a do úplného vyrovnání zbývá právě výška e . Tato hodnota je na počátku řešení volena a dále je dána konstrukčním a technickým uspořádáním úsporných nádrží. [11][14]

Při výpočtu potřeby vody k proplavení je dále užito podobných vzorců jako v kapitole 6.1. Místo celkového spádu se však uvažuje pouze výška dopouštěné vrstvy v .

Potřeba vody pro jednotlivé proplavení plavební komorou s užitím úsporných nádrží se vypočítá dle vzorce:

$$V_1 = Fv \pm W \quad (7.7)$$

Při pravidelném obousměrném proplavování je k proplavování nutný pouze poloviční objem a rovnice má tak tvar:

$$V_2 = 0,5Fv \quad (7.8)$$

Při nepravidelném proplavování je uvažováno s průměrem:

$$V_3 = \frac{Fv + 0,5Fv}{2} = 0,75Fv \quad (7.9)$$

Úspora vody pro jednotlivé proplavení se určí ze vztahu:

$$V_{u1} = Fkt \pm W = Fkmh \pm W \quad (7.10)$$

V případě pravidelného střídavého proplavování v obou směrech platí:

$$V_{u2} = 2Fkt = 2Fkmh \quad (7.11)$$

Pro případ reálnějšího nepravidelného provozu platí vztah:

$$V_{u3} = 0,5Fkt + Fkt = 1,5Fkt = 1,5Fkmh \quad (7.12)$$

7.1.1. Návrh úsporných nádrží – Plavební komora Vnorovy I

Pro plavební komoru Vnorovy I proběhlo posouzení návrhu počtu a plochy úsporných nádrží ve čtyřech variantách. Návrh byl posouzen pro jednu, dvě, tři a čtyři úsporné nádrže a pro čtyři velikosti ploch úsporných nádrží.

Nejdříve byl výpočet proveden pro plochu rovnou ploše plavební komory. Ve druhé variantě byla uvažována přesně polovina plochy plavební komory. U třetí varianty byl

výpočet proveden pro maximální půdorysnou plochu úsporné nádrže, kterou je možné v území umístit. Tato plocha je větší než plocha plavební komory. Ve čtvrté variantě byla zvolena poloviční plocha z plochy uvedené ve variantě 3. Prostorové uspořádání ploch úsporných nádrží je patrné z nákresu v příloze 6. U varianty 1 a 3 je možné nádrže umístit nad sebe, zatímco u varianty 2 a 4 je nutné nádrže umístit vedle sebe. V příloze 7 jsou v tabulce uvedeny výsledné hodnoty pro jednotlivé varianty ploch a počtu úsporných nádrží. Výpočet byl proveden podle vzorců z kapitoly 7.1.

Z tabulky v příloze 7 je patrné, že při zvyšování plochy úsporné nádrže nad plochu plavební komory neroste již tak značně úspora vody. To je zapříčiněno výškovým uspořádáním těchto nádrží, kdy se voda převádí pouze gravitačně. Rovněž s přibývajícím počtem nádrží, není nárůst úspory vody tak rapidní.

S přibývajícím počtem nádrží roste i doba plnění (prázdnění) plavební komory. S přihlédnutím k vytiženosti plavební komory, úspoře vody a době proplavování byl návrh dále posouzen pouze pro dvě úsporné nádrže.

Z uvedených variant byla vybrána pro další posouzení varianta 1 a varianta 4. V tabulce v příloze 7 jsou tyto varianty vyznačeny modře. Nádrže je v důsledku zastavěnosti levého břehu možné navrhnout pouze na pravé straně.

Ve variantě 1 byla snaha o umístění nádrží nad sebe, a tedy úsporu místa vedle plavební komory. Tato konstrukce je však složitější. Výhodou může být možnost zakrýt tyto úsporné nádrže. Při umístění nádrží nad sebou musí být plocha úsporných nádrží rovna, nebo větší než plocha plavební komory. Uvedený výpočet v kapitole 7.1. však nebere v úvahu tloušťku stěny nádrže. Aby bylo možno nádrže umístit nad sebe, byla přepočtena plocha úsporných nádrží. Dno nádrže bylo navrženo tloušťky 30 cm, proto je nárůst plochy při poměrně malé hloubce vody v úsporných nádržích enormní, téměř o polovinu původně počítané plochy. Tím se tak eliminovala výhoda menší zabrané plochy.

Je patrné, že prvotní návrh půdorysných rozměrů u varianty 3, by se do území při umístění nádrží nad sebou nevešel. Ve variantě 4 je uvažováno s umístěním nádrží vedle sebe. Plocha úsporných nádrží se při této variantě dále nemění.

V první fázi výpočtu byla nejdříve zvolena hodnota e jako nulová, později byla zvolena rovna 5 cm.

Výsledné hodnoty pro variantu 1 a pro variantu 4 jsou uvedeny v následující Tab. 13.

Tab. 13 - Výsledné hodnoty výpočtu úsporných nádrží u plavební komory Vnorovy I

	Varianta 1	Varianta 2		
n	4	4	-	počet vrstev
k	2	2	-	počet nádrží
e	0,05	0,05	m	zbytková výška do úplného vyrovnání hladin
U	533,00	215,04	m ²	plocha hladiny úsporných nádrží
F	285,06	285,06	m ²	plocha hladiny plavební komory
m	1,87	0,75	-	poměr ploch úsporných nádrží a plavební komory
h	0,42	0,85	m	hloubka vody v úsporných nádržích
t	0,79	0,64	m	výška vrstvy v plavební komoře
v	1,31	1,59	m	zbylá výška v plavební komoře (nutno dopouštět)
V₁	492,60	574,57	m ³	potřeba vody pro jednotlivé proplavení z horní zdrže do dolní
V₁	252,60	334,57	m ³	potřeba vody pro jednotlivé proplavení z dolní zdrže do horní
V₂	186,30	227,28	m ³	potřeba vody pro obousměrné pravidelné proplavování
V₃	279,45	340,93	m ³	potřeba vody při nepravidelném proplavování
V_{u1}	568,37	486,40	m ³	úspora vody pro jednotlivé proplavení z horní zdrže do dolní
V_{u1}	328,37	246,40	m ³	úspora vody pro jednotlivé proplavení z dolní zdrže do horní
V_{u2}	896,74	732,81	m ³	úspora vody pro obousměrné pravidelné proplavování
V_{u3}	672,56	549,61	m ³	úspora vody při nepravidelném proplavování

Při porovnání výsledků s potřebou vody pro jednoduchou plavební komoru Vnorovy I z kapitoly 6.1.1 činí potřeba vody při využití úsporných nádrží z varianty 1 pro jednotlivé proplavení z horní zdrže 52,35 % z původní, ve variantě 4 vychází tato potřeba 61,06 % z původní potřeby vody. I při menší ploše úsporných nádrží než plocha plavební komory, vychází úspora vody ve variantě 4 jako velmi příznivá.

Schématický řez a půdorys obou variant je součástí Přílohy 8 a 9. Terén pro tyto řezy byl sestaven z digitálního modelu reliéfu České republiky 5. generace, dostupného na stránkách Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního.

V obou případech realizace úsporných nádrží by bylo třeba přemístit provozní budovu pro obsluhu plavební komory. Taktéž se zde nachází přístřešek a provizorní budova

sloužící soukromému přístavišti Vnorovy. Pozemek je ve vlastnictví České republiky s právem hospodařit státním podnikem Povodí Moravy. Vzhledem k nedostatku místa v této lokalitě je uvažováno s umístěním opěrné zdi u úsporných nádrží, namísto postupného svahování terénu.

Na Obr. 30 je vyfocena provozní budova na pravém břehu u plavební komory Vnorovy I.



Obr. 30 - Provozní budova pro obsluhu plavební komory Vnorovy I

7.1.1.1. Doba plnění a prázdnění - varianta 1

Pro porovnání byly zvoleny parametry stejné jako při plnění samostatné plavební komory: plocha výpustného potrubí úsporných nádrží, součinitel vyjadřující ztráty, doba otevírání uzávěru. Doba zavírání uzávěru mezi jednotlivými fázemi byla volena s ohledem na výšku zdvihu za sekundu, tato rychlost byla volena do 5 cm za sekundu. Při výšce uzávěru 1 m vychází doba zavírání na 20 s. Uvažuje se zaústěním tohoto potrubí do uklidňovací komory, která je součástí podzáporníkového plnění plavební komory. Uvažuje se s jedním systémem pro plnění i pro prázdnění úsporných nádrží.

V Tab. 14 a Tab. 15 jsou uvedeny nadmořské výšky hladin v komoře a v úsporné nádrži při plnění a prázdnění plavební komory.

Tab. 14 – Nadmořské výšky při plnění plavební komory s úspornými nádržemi

	Hladina vody v komoře	Hladina vody v úsporné nádrži	
Plnění komory	m n.m.	m n.m.	
1.fáze – Plnění z 1. úsporné nádrže			
	167,02	168,28	Začátek otevírání uzávěru
	167,81	167,86	Končí plnění z 1. úsporné nádrže
2.fáze – Plnění z 2. úsporné nádrže			
	167,81	169,06	Začátek otevírání uzávěru
	168,59	168,64	Končí plnění z 2. úsporné nádrže
3.fáze – Doplnění z horní zdrže			
	168,59		Začne otevírání uzávěr (válc.stav.)
	169,90		Končí plnění plavební komory

Tab. 15 – Nadmořské výšky při prázdnění plavební komory s úspornými nádržemi

	Hladina vody v komoře	Hladina vody v úsporné nádrži	
Prázdnění komory	m n.m.	m n.m.	
1.fáze – Prázdnění do 1. úsporné nádrže			
	169,90	168,64	Začátek otevírání uzávěru
	169,11	169,06	Končí plnění 1. úsporné nádrže
2.fáze – Prázdnění do 2. úsporné nádrže			
	169,11	167,86	Začátek otevírání uzávěru
	168,33	168,28	Končí plnění 2. úsporné nádrže
3.fáze – Prázdnění do dolní zdrže			
	168,33		Začne otevírání uzávěru (stavítka)
	167,02		Končí prázdnění plavební komory

Doba plnění a prázdnění plavební komory byla určena pomocí vzorců z kapitoly 4.1. Doba plnění plavební komory Vnorovy I s úspornými nádržemi je uvedena v Tab. 16.

Tab. 16 - Doba plnění komory s úspornými nádržemi – varianta 1

	Fáze 1	Fáze 2	Fáze 3	
Plnění z	1.úsporné nádrže	2.úsporné nádrže	horní zdrže	
t_{otev}	30,00	30,00	30,00	s
F_1	533,00	533,00		m ²
F_2	285,06	285,06	285,06	m ²
H	1,26	1,26	1,31	m
f	0,79	0,79	0,79	m ²
μ_s	0,45	0,45	0,45	-
T	279,47	279,47	221,97	s
	4,66	4,66	3,70	min
t_{zav}	20,00	20,00		s
T_{celk}	4,99	4,99	3,70	min
ΣT_{celk}			13,68	min

Doba prázdnění plavební komory Vnorovy I s úspornými nádržemi je uvedena v Tab. 17.

Tab. 17 - Doba prázdnění komory s úspornými nádržemi – varianta 1

	Fáze 1	Fáze 2	Fáze 3	
Prázdnění do	1.úsporné nádrže	2.úsporné nádrže	dolní zdrže	
t_{otev}	30,00	30,00	30,00	s
F_1	532,96	532,96		m ²
F_2	285,06	285,06	285,06	m ²
H	1,26	1,26	1,31	m
f	0,79	0,79	0,79	m ²
μ_s	0,45	0,45	0,76	-
T	279,48	279,48	137,57	s
	4,66	4,66	2,29	min
t_{zav}	20,00	20,00		s
T_{celk}	5,00	5,00	2,29	min
ΣT_{celk}			12,29	min

Z výpočtu z kapitoly 5.1.1 a 5.1.2 pro plavební komoru Vnorovy I vychází doba plnění 10,55 minut a doba prázdnění 7,00 minut. Po prvních 2 fázích při plnění (prázdnění) je třeba vyčkat, než se uzávěry potrubí příslušné fáze zavřou ($t_{\text{zav}} = 20$ s). Při použití úsporných nádrží dle této varianty by tak bylo prodloužení doby plnění o 3,13 minuty a doby prázdnění o 5,29 minuty, celkem o 8,42 minuty.

Při výpočtu bylo uvažováno se stejným součinitelem jako při plnění a prázdnění samotné plavební komory. Při dosažení stejného součinitele prázdnění, jakého je dosaženo při prázdnění nyní ($\mu_s = 0,76$), by doba prázdnění byla delší pouze o 1,68 minuty. Při uvažování dosažení tohoto součinitele i při plnění nového systému úsporných nádrží, by doba plnění mohla být i kratší, samozřejmě s posouzením bezpečnosti proplavované lodě. Je tak patrné, že hydraulické ztráty mají velký vliv na dobu plnění, případně prázdnění plavební komory.

7.1.1.2. Doba plnění a prázdnění – varianta 4

Pro variantu 4 s umístěním nádrží vedle sebe proběhlo posouzení doby plnění stejným způsobem jako ve variantě 1. V Tab. 18 jsou uvedeny nadmořské výšky hladin v komoře a v úsporné nádrži při plnění plavební komory Vnorovy I s úspornými nádržemi.

Tab. 18 – Nadmořské výšky při plnění plavební komory s úspornými nádržemi

	Hladina vody v komoře	Hladina vody v úsporné nádrži	
Plnění komory	m n.m.	m n.m.	
1.fáze – Plnění z 1. úsporné nádrže			
	167,02	168,56	Začátek otevírání uzávěru
	167,66	167,71	Končí plnění z 1. úsporné nádrže
2.fáze – Plnění z 2. úsporné nádrže			
	167,66	169,21	Začátek otevírání uzávěru
	168,31	168,36	Končí plnění z 2. úsporné nádrže
3.fáze – Doplnění z horní zdrže			
	168,31		Začne otevírání uzávěru (válc.stav.)
	169,90		Končí plnění plavební komory

V Tab. 19 jsou uvedeny nadmořské výšky hladin v komoře a v úsporných nádržích při prázdnění plavební komory.

Tab. 19 – Nadmořské výšky při prázdnění plavební komory s úspornými nádržemi

	Hladina vody v komoře	Hladina vody v úsporné nádrži	
Prázdnění komory	m n.m.	m n.m.	
1.fáze – Prázdnění do 1. úsporné nádrže			
	169,90	168,36	Začátek otevírání uzávěru
	169,26	169,21	Končí plnění 1. úsporné nádrže
2.fáze – Prázdnění do 2. úsporné nádrže			
	169,26	167,71	Začátek otevírání uzávěru
	168,61	168,56	Končí plnění 2. úsporné nádrže
3.fáze – Prázdnění do dolní zdrže			
	168,61		Začne otevírání uzávěru (stavítka)
	167,02		Končí prázdnění plavební komory

Doba plnění plavební komory Vnorovy I s úspornými nádržemi z varianty 4 je uvedena v Tab. 20.

Tab. 20 - Doba plnění komory s úspornými nádržemi – varianta 4

	Fáze 1	Fáze 2	Fáze 3	
Plnění z	1.úsporné nádrže	2.úsporné nádrže	horní zdrže	
t_{otev}	30,00	30,00	30,00	s
F₁	215,04	215,04		m ²
F₂	285,06	285,06	285,06	m ²
H	1,54	1,54	1,59	m
f	0,79	0,79	0,79	m ²
μ_s	0,45	0,45	0,45	-
T	208,49	208,49	243,60	s
	3,47	3,47	4,06	min
t_{zav}	20,00	20,00		s
T_{celk}	3,80	3,80	4,06	min
ΣT_{celk}			11,66	min

V Tab. 21 je uvedena doba prázdnění plavební komory Vnorovy I s užitím úsporných nádrží z varianty 4.

Tab. 21 - Doba prázdnění komory s úspornými nádržemi – varianta 4

	Fáze 1	Fáze 2	Fáze 3	
Prázdnění do	1.úsporné nádrže	2.úsporné nádrže	dolní zdrže	
t_{otev}	30,00	30,00	30,00	s
F₁	215,04	215,04		m ²
F₂	285,06	285,06	285,06	m ²
H	1,54	1,54	1,59	m
f	0,79	0,79	0,70	m ²
μ_s	0,45	0,45	0,76	-
T	208,49	208,49	150,36	s
	3,47	3,47	2,51	min
t_{zav}	20,00	20,00		s
T_{celk}	3,80	3,80	2,51	min
ΣT_{celk}			10,11	min

Při porovnání doby plnění a prázdnění s komorou bez úsporných nádrží, vychází doba plnění o 1,11 minuty delší a prázdnění o 3,11 minuty delší, celkem tedy o 4,22 minut delší cyklus. Při stejném součiniteli prázdnění, jakého je dosaženo při prázdnění nyní, by doba prázdnění byla delší o 0,50 minuty.

Vzhledem k vytíženosti plavebních komor je větší prodloužení proplavovacího cyklu nepřijatelné. V hlavní turistické sezóně by lodě mohly vyčkávat dlouhou dobu před plavební komorou a byla by zde vytvořena překážka na vodní cestě. U varianty 4 vyšlo celkové prodloužení doby plnění (prázdnění) o 3,54 minuty kratší než u varianty 1, při potřebě vody pro jednotlivé proplavení větší o přibližně 9 %. V předešlých letech bylo v období s nedostatkem vody omezováno proplavování a zároveň zde byla snaha o proplavení více plavidel najednou. Některá plavidla tak musela vyčkávat před plavební komorou. Při použití úsporných nádrží by tak mohla být proplavena plavidla rovnou, při delší době proplavení. Úsporné nádrže by tak mohly být v provozu pouze při těchto kritických situacích s nedostatkem vody v jižní části kanálu. Vhodným hydraulickým řešením plnicího (prázdníciho) systému úsporných nádrží by nárůst prodloužení také nebyl tak velký. Použití úsporných nádrží vede k prodloužení proplavovacího cyklu, z hlediska podélných sklonů je zde však dostatečná rezerva. Současná doba plnění je

podřízena nevyhovujícímu tlumení kinetické energie a s tím spojeným podmínkám na počátku užité délky plavební komory, této problematice se věnuje další část této práce.

7.1.2. Návrh úsporných nádrží – Plavební komora Vnorovy II

Vzhledem k malému spádu plavební komory je návrh a realizace úsporných nádrží vedle plavební komory nereálná a tato možnost nebyla dále posouzena.

Dalším možným řešením pro úsporu vody při proplavování by mohlo být vypouštění části vody při prázdnění plavební komory Vnorovy I do bočního kanálu, který zásobuje jižní část kanálu. Hladina je zde zajištěna stavidly umístěnými na této části kanálu na kótě 167,90 m n.m. Tato kóta je horní plavební hladinou pro plavební komoru Vnorovy II. Tím by docházelo k nadlepšování množství vody v dolním úseku a uspořila by se tak část vody potřebná k proplavení. V minulosti zde takové potrubí mělo být postaveno. V současnosti se však nevyužívá a pravděpodobně nelze kvůli technickému stavu využít.

8. TLUMENÍ KINETICKÉ ENERGIE

Na plavební komoře Vnorovy I je využito plnění pomocí krátkého obtoku, zaústěného pod záporníkem horních vrat. Tento způsob plnění se často využívá u plavebních komor s malým a středním spádem. Z informací od Povodí Moravy s.p. a ŘVC ČR bylo zjištěno, že při plnění plavební komory Vnorovy I dochází k nepříjemným a nebezpečným účinkům vodního proudu na proplavovaná plavidla, zejména na malá a sportovní plavidla. V kapitole 5.1.1 byl posouzen stávající systém plnění na maximální sílu v úvazných lanech pro návrhové plavidlo, přestože maximální dovolené síly nebyly překročeny, je možný vznik nepříznivých proudových poměrů na začátku užité délky plavební komory. Proto v další části této práce byl posouzen stávající plnicí systém a dále navržena vhodná opatření pro lepší tlumení kinetické energie při plnění plavební komory. U plavební komory Vnorovy II nebyl tento problém zaznamenán, a tudíž nebyl posuzován.

8.1. Matematické modelování turbulentního proudění

Při řešení bylo použito programu ANSYS Fluent 2019 R3, který umožňuje matematické modelování proudění tekutin, v angličtině označené pomocí zkratky CFD (Computational fluid dynamics). Cílem matematického modelování je simulování skutečného hydraulického jevu pomocí matematického modelu, při zavedení určitých podmínek a zjednodušení.[16]

Při proudění tekutiny rozlišujeme proudění laminární a turbulentní. Daleko častěji se setkáváme s pohybem turbulentním, u kterého je však složitější přesná matematická formulace. Turbulentní proudění se tak často popisuje pomocí seznamu vlastností. Mezi charakteristické vlastnosti patří náhodnost, vířivost a prostorovost. Kombinací rovnice kontinuity ze zákona zachování hmotnosti a Navier-Stokesovy rovnice ze zákona zachování hybnosti, lze popsat oba režimy proudění. V tomto případě nebyl řešen přenos energie, tudíž nebylo třeba užít zákona zachování energie. [17]

V řešeném případě se jedná o turbulentní proudění, pro které se v současnosti vyskytuje celá řada zjednodušených modelů pro výpočet. Každý model je vhodný pro určitý typ řešené úlohy. Pro výpočet byla zvolena metoda řešení matematického modelu proudění RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equations), která řeší časově

zestředněné bodové rychlosti a tlaky, soustavu rovnic je však nutno doplnit modelem turbulence, který simuluje vliv flukтуаčních složek veličin. [18][19]

Mezi další metody patří DNS (Direct Numerical Simulation) – přímá simulace Navier-Stokesových rovnic a LES (Large Eddy Simulation) - metoda simulace velkých vírů, která kombinuje oba přístupy. Oba tyto přístupy jsou však výrazně náročnější na výpočetní síť a techniku.[18][19]

Při zjednodušení řešení rovnic proudění metodou RANS je třeba model doplnit modelem turbulence, v těchto modelech je uvažováno s hodnotou turbulentní viskozity μ_t . V případě metody RANS jsou dostupnými modely pro řešení: algebraické modely, jednorovnicové modely (1 diferenciální transportní rovnice), dvourovnicové modely (2 diferenciální transportní rovnice). Mezi nejčastěji používané dvourovnicové modely patří model k- ϵ a k- ω . Dvourovnicový model k- ϵ , který řeší turbulentní viskozitu prostřednictvím dvou diferenciálních rovnic, se hodí více pro popis turbulentního proudění ve volném proudu, zatímco model k- ω se hodí pro popis proudění například u stěny, nebo lopatky turbíny. Při výpočtu proudění u plavební komory Vnorovy I byl využit modifikovaný model k- ϵ , konkrétně RNG k- ϵ model. Tento model oproti původnímu zahrnuje některá vylepšení a zvyšuje přesnost výsledků. [17][18][19]

8.2. Program ANSYS Fluent

Nyní již celosvětově rozšířený výpočetní program ANSYS Fluent patří do skupiny programů ANSYS. Řadí se k nejkompaktnějším softwarovým balíčkům pro modelování CFD. Umožňuje modelovat proudění vody, ale například i vzduchu, turbulence, přenos tepla a další. [16]

ANSYS Fluent byl spouštěn pomocí programu ANSYS Workbench, který tvoří základní softwarové prostředí (pracovní prostor) pro provádění analýz s jednotlivými systémy, které postupně zadáváme. Každý systém představuje postupné kroky nezbytné pro provedení výpočtu. Prostředí Workbench umožňuje tyto systémy kdykoli přidávat, propojit, nebo přenášet. [16]

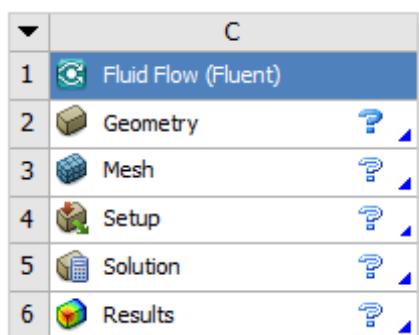
Program využívá metodu konečných objemů, tedy síť prvků, které se vzájemně nepřekrývají. Jednotlivé elementy sítě potom mohou tvořit kvádry, čtyřstěny nebo pyramidy. Ve výpočtu bylo užito sítě nestrukturované, která umožňuje zhuštění sítě a je vhodnější pro složitější geometrie.[16][17]

8.3. Využití superpočítače SGI ALTIX UV 100

Studentská verze programu ANSYS Fluent umožňuje provádět výpočty do počtu elementů menších nebo rovno 512 000. Výpočet pro celou plavební komoru by však při tomto počtu buněk byl značně nepřesný. Proto byl výpočet nejprve vyzkoušen s hrubou sítí s využitím studentské licence programu a následně byl spouštěn pomocí dálkového přístupu s jemnější sítí na výkonnějším počítači s plnou licencí programu. Tento počítač spravuje Výpočetní a informační centrum ČVUT. Při tomto výpočtu bylo využito počítače SGI ALTIX UV 100, který disponuje 12x6 jádrovými procesory Intel Xeon 2,66 GHz a 775 GB RAM. Při jednotlivých výpočtech bylo vždy využito 12 jader počítače. [20]

8.4. Tvorba modelu

Při spuštění programu ANSYS Fluent nám program nabídne 5 kroků, obvykle se postupuje shora dolů. Na Obr. 31 lze vidět základní rozhraní programu ANSYS Fluent.



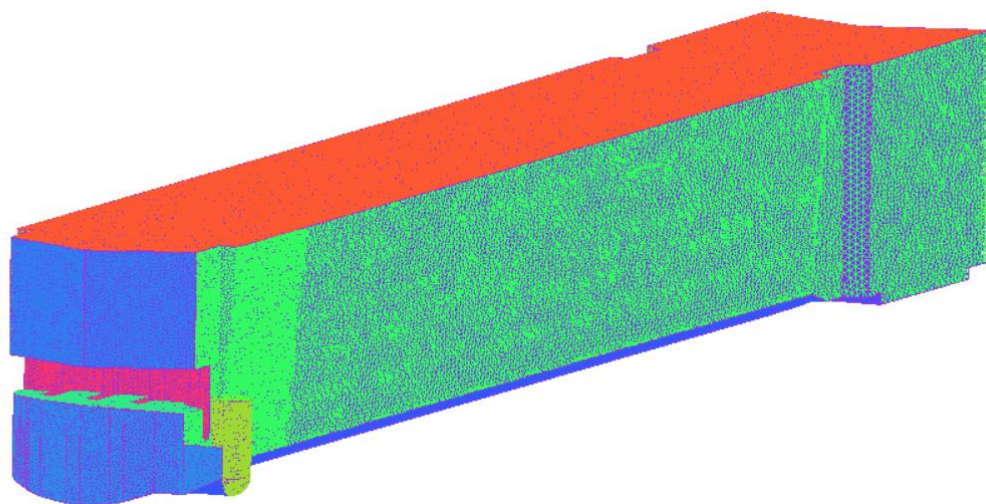
Obr. 31 – Základní rozhraní programu ANSYS Fluent

V prvním kroku Geometry je zde možnost importovat, vytvářet nebo aktualizovat geometrii modelu používanou pro výpočet. V dalším kroku Mesh program umožňuje vytvoření nebo import výpočetní sítě. Další krok představuje samotné nastavení výpočtu, například volbu látek, modelu turbulence, okrajových a počátečních podmínek a dalších. V této fázi je již možné spustit výpočet, který je možné i přerušit a znovu spustit. Výsledky je následně možné načíst pomocí Results, které se zobrazí v dalším podprogramu ANSYS CFD-Post, kde je lze přehledně zobrazit, do detailů analyzovat, případně exportovat, nebo porovnat mezi sebou.[16]

8.5. Geometrie a výpočetní síť

Geometrie pro plavební komoru Vnorovy I byla vytvořena v programu Autocad 2018, který umožňuje tvorbu modelu ve 3D. Trojrozměrný model byl vykreslen podle 2D výkresů plavební komory. Model plavební komory je součástí přílohy 10 a 11.

V další fázi byla tvořena výpočetní síť. Přestože program ANSYS Fluent umožňuje vytvoření sítě přímo, byl zvolen další podprogram a tím byl ICEM CFD 2019 R3. V tomto programu je umožněno lépe kontrolovat jednotlivé elementy a s tím spojenou kvalitu sítě. Obecně platí, že čím více elementů má síť, tím je delší výpočet, zároveň lze ale výpočet považovat za přesnější. Připravená geometrie z programu CAD byla vložena do tohoto programu. Dále byly pojmenovány jednotlivé plochy, to nám následně umožnilo nastavení různých velikostí elementů pro povrchovou síť na jednotlivých plochách, nastavení podmínek a dále lepší zobrazení výsledků. Dalším krokem bylo zhuštění sítě v námi definovaných místech. U plavební komory Vnorovy I proběhlo zhuštění sítě na začátku plavební komory do vzdálenosti 6 m od horních vzpěrných vrat. Program umožňuje volbu zjemnění přechodu mezi jednotlivými velikostmi elementů. Následně byla vygenerována povrchová a objemová síť. Na Obr. 32 je viditelná povrchová i objemová síť plavební komory Vnorovy I.



Obr. 32 – Vygenerovaná síť plavební komory Vnorovy I

Síť byla dále vylepšena funkcí smooth. Kvalita sítě je posuzována velikostí jednotlivých elementů, uspořádáním v prostoru a rozměrovou podobností jednotlivých buněk. Právě rozměrovou podobnost nám funkce smooth umožňuje vylepšit. Tato funkce

nám pomáhá modifikovat elementy do námi určené zadané hodnoty poměru jednotlivých hran elementů. U většiny modelů by měly mít všechny prvky poměr větší než 0,3, u komplikovanějších modelů se udává hodnota minimálně 0,15. [21]

V programu ICEM CFD si můžeme jednotlivé elementy zobrazit, případně síť upravit. Všechny sítě, které byly při výpočtech použity, dosahovaly hodnoty poměru rozměrové podobnosti minimálně 0,3, počet elementů se vždy pohyboval okolo 6 milionů. Maximální velikost elementů v samotné plavební komoře byla zvolena 0,25 m, na začátku plavební komory 0,10 m a u vtoku do modelu dokonce 0,05 m. Takto upravená síť byla dále načtena v samotném programu ANSYS Fluent, kde byl výpočet dále nastaven.

8.6. Nastavení modelu

Pro výpočet byl zvolen model ustáleného dvoufázového proudění. Pro bezpečnost proplavovaného plavidla jsou důležité maximální rychlosti na začátku užité délky plavební komory při maximálním plnicím průtoku. Zajímala nás tedy jen maximální hodnota, proto nebylo nutné modelovat celý cyklus plnění a zvedání válcového stavidla. Pro model je nutno nadefinovat všechna vstupní data a okrajové podmínky. V počátku se nastaví proudění ustálené, nebo neustálené, směr a velikost gravitačního zrychlení. Dále se nastaví model multifázového proudění, v tomto případě byl zvolen model VOF (Volume of fluid), který se používá při proudění dvou nemísitelných látek a je zaměřen na sledování rozhraní těchto dvou látek. V každém elementu je sledován hmotnostní zlomek obou fází. [22]

Dále byl pro model VOF zvolen Open Channel Flow, tedy proudění s volnou hladinou mezi pevnými stěnami. Dvoufázové proudění v tomto modelu tvoří vzduch a voda s vlastnostmi při konstantní teplotě.

8.6.1. Okrajové podmínky

V této fázi modelování byly nadefinovány všechny okrajové podmínky. Podmínky byly přiřazeny tak, aby vytvořený model, co nejvíce odpovídal reálnému proudění v plavební komoře.

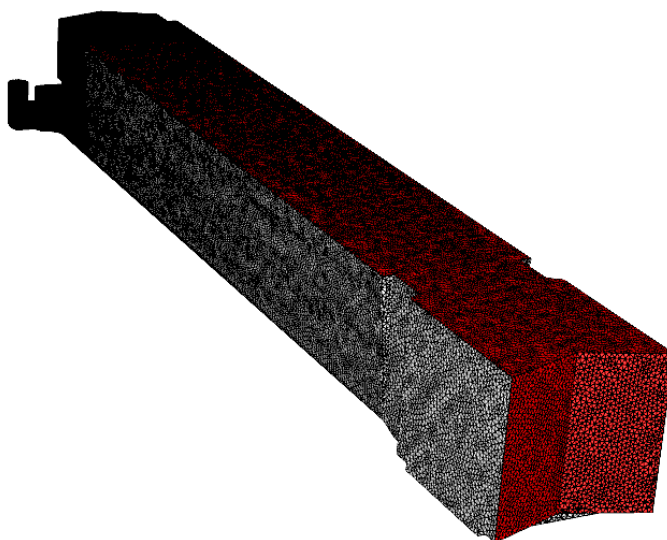
8.6.1.1. Vtok do modelu

Jako vtok do modelu se nastavila podmínka velocity-inlet, která se používá pro definování rychlosti na vstupu do modelu. V našem modelu to bylo vtokové potrubí plnicího systému. Hodnota rychlosti při maximálním plnicím průtoku byla převzata z výpočtu z kapitoly 5.1.1, tedy $v_{\max} = 3,34$ m/s. Zde byla nastavena hodnota volume fraction pro vodu 1, tedy že do modelu touto okrajovou podmínkou vtéká pouze voda.

8.6.1.2. Výtok z modelu

Pro umožnění výtoku z modelu byly definovány dvě okrajové podmínky. Na dolních vrátech plavební komory byla nastavena podmínka pressure-outlet. U této podmínky se nastaví výška volné hladiny od zadané úrovně dle souřadného systému. Tato výška při maximálním plnicím průtoku byla také známa dle předchozího výpočtu a je rovna 167,099 m n.m.

Druhá okrajová podmínka byla nastavena na stropu plavební komory jako outlet-vent. U této podmínky bylo důležité pro fázi voda nastavit backflow volume fraction na hodnotu 0. Tedy, že se do modelu může za této podmínky vracet pouze vzduch. Na Obr. 33 je zobrazena výpočetní síť, kde lze vidět obě zadané okrajové podmínky, jsou zde zobrazeny červenou barvou.



Obr. 33 – Okrajové podmínky výtoku z modelu

8.6.1.3. Stěny modelu

Ostatní části modelu byly nastaveny jako podmínka wall, která simuluje proudění v blízkosti stěny. Podmínky byly nastaveny jako no slip wall, také je zde možnost nastavení drsnosti stěny. Defaultní nastavení této hodnoty drsnosti přibližně odpovídá betonovým zdím, proto byla tato hodnota ponechána.

8.6.2. Počáteční podmínka

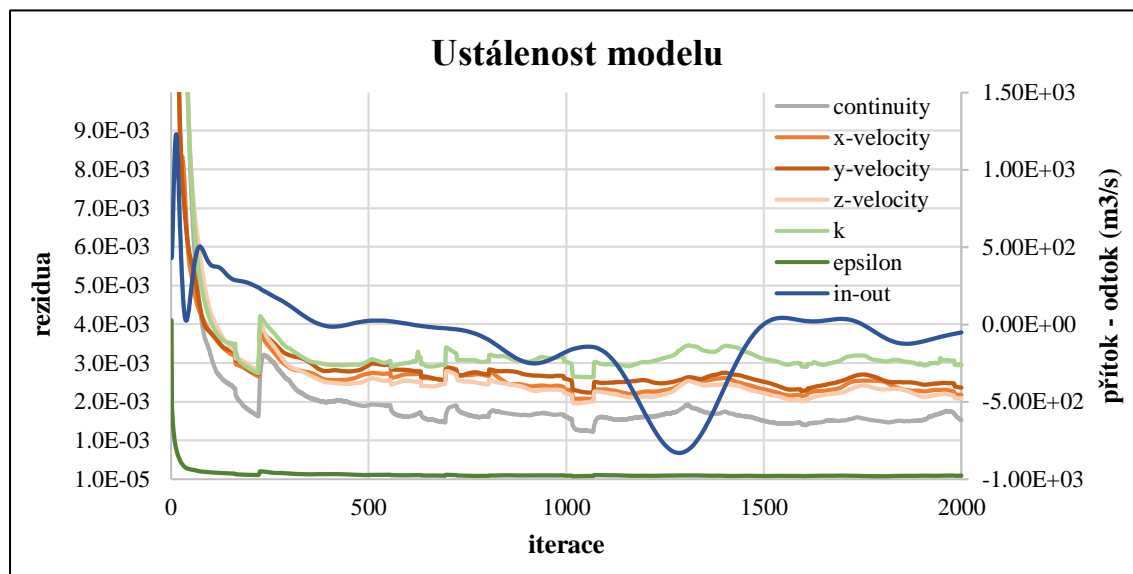
V další fázi modelování bylo u výpočtu nastaveno, že model je plný vody. Byl nastaven takzvaný region, kde výška vody odpovídala výšce zadané volné hladiny. Tím se tak zkrátil výpočetní čas, protože jsme nemuseli čekat až se model vodou zaplní. Pro další varianty výpočtu bylo využito funkce interpolate. Program umožňuje z proběhlého výpočtu vyexportovat data, která potom slouží jako počáteční data pro další výpočty se změněnou sítí, u kterých se tím výrazně sníží výpočetní čas. Této možnosti mohlo být využito, protože změna geometrie jednotlivých dalších variant nebyla výrazná.

8.7. Výpočet a ustálení modelu

Po nastavení počátečních a okrajových podmínek již bylo přistoupeno k samotnému výpočtu. Vzhledem k počtu elementů bylo využito výpočetní techniky Výpočetního a informačního centra ČVUT. Výpočet byl i přes využití výkonného počítače velmi časově náročný. Aby mohl být výpočet považován za dostatečně věrohodný, bylo sledováno ustálení modelu. Ustálení modelu bylo sledováno pomocí dvou parametrů. Jedním z těchto parametrů byly průměrné hodnoty reziduí. Ty jsou vyhodnocovány při každém kroku iterace pro všechny počítané veličiny. Aby mohl být výpočet považován za ustálený je obecně požadováno, aby hodnoty měly klesající charakter a nejlépe aby sledovaná rezidua klesla k hodnotě $1 \cdot 10^{-3}$ až $1 \cdot 10^{-4}$. [17]

Další sledovaný parametr ukazující ustálení modelu je sledování odtoku z modelu, tedy změnu průtoku v modelu. Předpokladem zákona zachování hmotnosti, který je zde vyjádřen rovnicí kontinuity, je přítok roven odtoku z modelu.

Na Obr. 34 je vynesena graf průběhu reziduí a na vedlejší ose je vynesena rozdíl přítoku a odtoku z modelu. Přibližně v 1500 iteracích je tento rozdíl roven 0 a výpočet je možno považovat za ustálený.

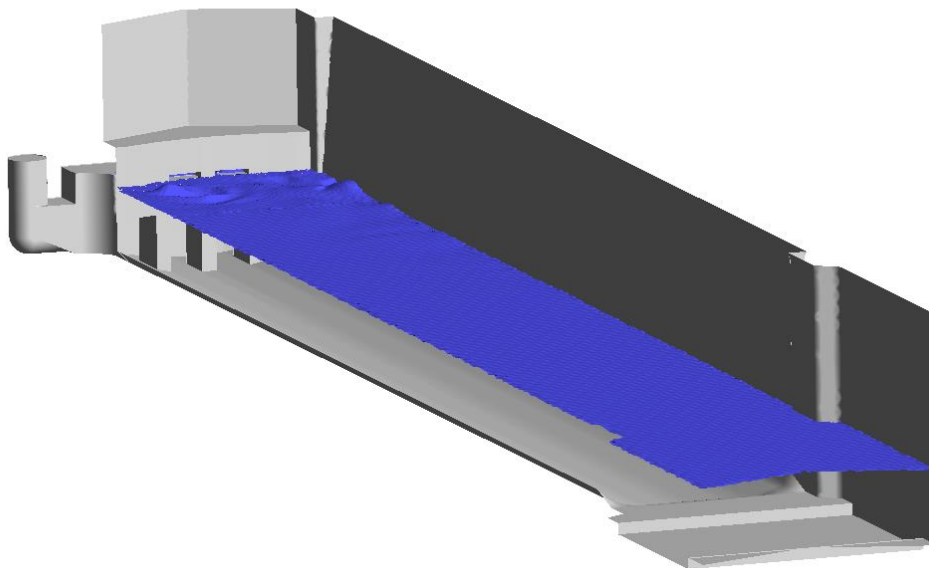


Obr. 34 – Průběh reziduí, přítoku a odtoku

Výpočet proběhl v ustáleném režimu pro jeden zatěžovací stav rovný maximálnímu plnicímu průtoku a jemu odpovídající hladině vody v plavební komoře. Pro kompletní představu o proudění vody v plavební komoře by bylo třeba realizovat více výpočtů pro několik zatěžovacích stavů při plnění plavební komory, nebo zvolit neustálený výpočet celého průběhu plnění plavební komory.

8.8. Vyhodnocení stávajícího stavu

Z výpočtu bylo zjištěno, že se hladina na počátku plavební komory jistou mírou vlní. To bylo zjištěno i při vlastní prohlídce místa. Na Obr. 35 lze na pohledu do plavební komory na počátku užité délky vidět zmíněné zvlnění.



Obr. 35 – Pohled na komoru s vyznačenou hladinou

Na Obr. 36 je vyfocen pohled na hladinu vody v plavební komoře Vnorovy I při jejím plnění.



Obr. 36 – Pohled na hladinu při plnění plavební komory

Toto zvlnění vzniká pravděpodobně tím, že proud vody naráží u dna na svislé pilíře pod záporníkem v uklidňovací komoře, od kterých je proud odražen rovnou

k hladině, kde následně při menších hloubkách vody v komoře na počátku plnění tvoří toto zvlnění a turbulence.

Jak již bylo zmíněno u modelu VOF je možnost sledovat hmotnostní zlomek obou fází. Rozhraní těchto dvou látek, tedy volná hladina se uvažuje a je možno ji zobrazit, pokud elementy obsahují přesně 0,55 vody z 1. Na Obr. 37 je vynesena průběh hladiny z výpočtu v programu ANSYS Fluent z příčného řezu na počátku užité délky ve vzdálenosti 3,1 m od horních vrat, kde byly následně zkoumány i další veličiny. Souřadnice x rovna 6 m odpovídá pravému břehu.

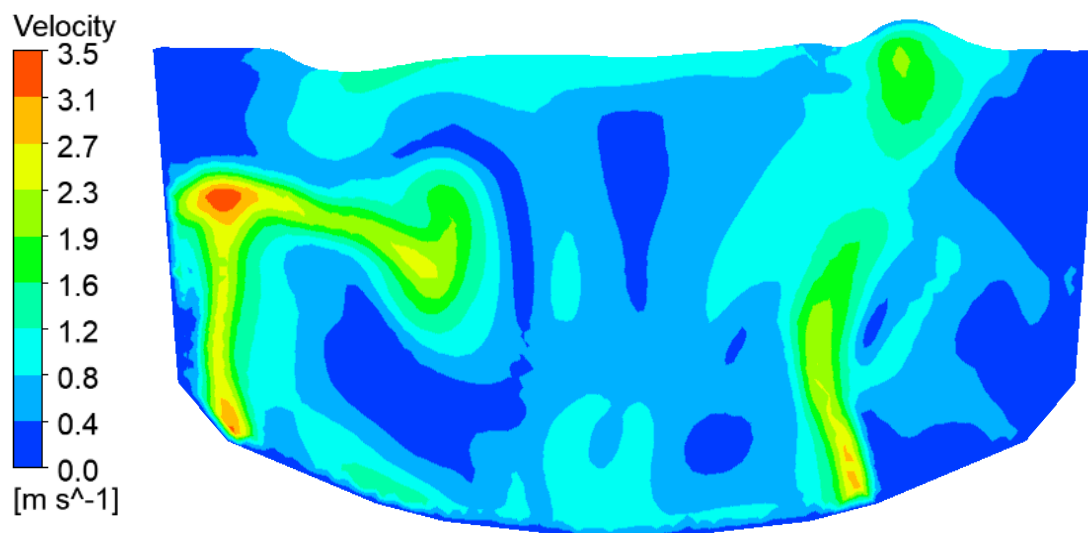


Obr. 37 – Průběh hladiny na počátku užité délky

Odchyšky hladiny od vodorovné úrovně dosahují v tomto příčném řezu hodnot od - 0,10 m do + 0,15 m. To přibližně odpovídá také skutečnosti zjištěné v rámci místního šetření.

Cílem výpočtu bylo zjistit maximální rychlosti na počátku užité délky. Při výpočtu bylo zjištěno, že převážná většina vody proudí nejvíce vzdáleným výtokovým oknem, kde tak vznikají maximální rychlosti. Je to dáno především geometrií uklidňovací komory, která není hydraulicky vhodně vyřešena. Při prohlížení výsledků nám program umožňuje si kdekoliv vytvořit řez a na něm zobrazit v tomto místě výsledky. Tohoto bylo využito a byl vytvořen příčný řez na začátku plavební komory ve vzdálenosti 3,1 m od horních vrat, tedy na počátku užité délky. Na tomto řezu bylo zobrazeno rozdělení rychlostí.

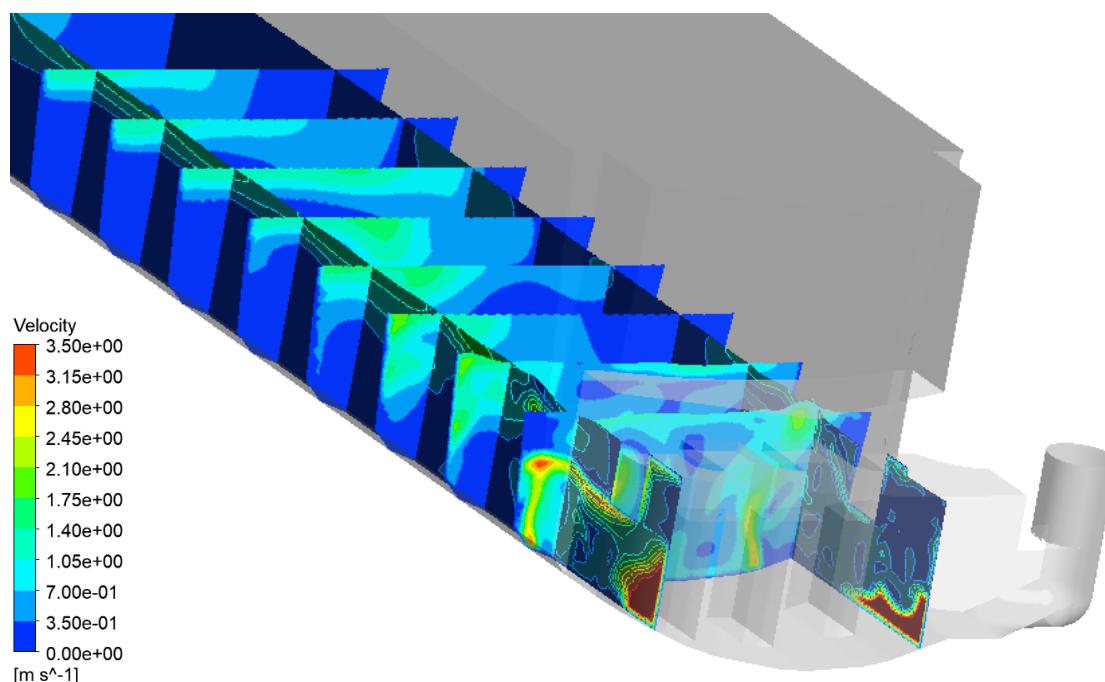
Rozdělení rychlostí na počátku užité délky je zobrazeno na Obr. 38



Obr. 38 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu na počátku užité délky

Maximální rychlost v tomto řezu je 3,49 m/s. Tato hodnota výrazně převyšuje bezpečnou hodnotu podélných rychlostí pro proplavení, která se udává mezi 0,8 – 1,0 m/s, výjimečně 1,5 m/s. Při uvažování maximální hodnoty 1,5 m/s je tak rychlost překročena více než dvakrát a proplavování může být pro menší plavidla opravdu nebezpečné. Rovněž již zmíněné vlnění na počátku plavební komory je pro malá plavidla nekomfortní.

Pro lepší představení proudění vody v komoře, byly sestrojeny i další řezy na kterých bylo zobrazeno rozdělení rychlostí. Tyto řezy jsou zřetelné na Obr. 39.



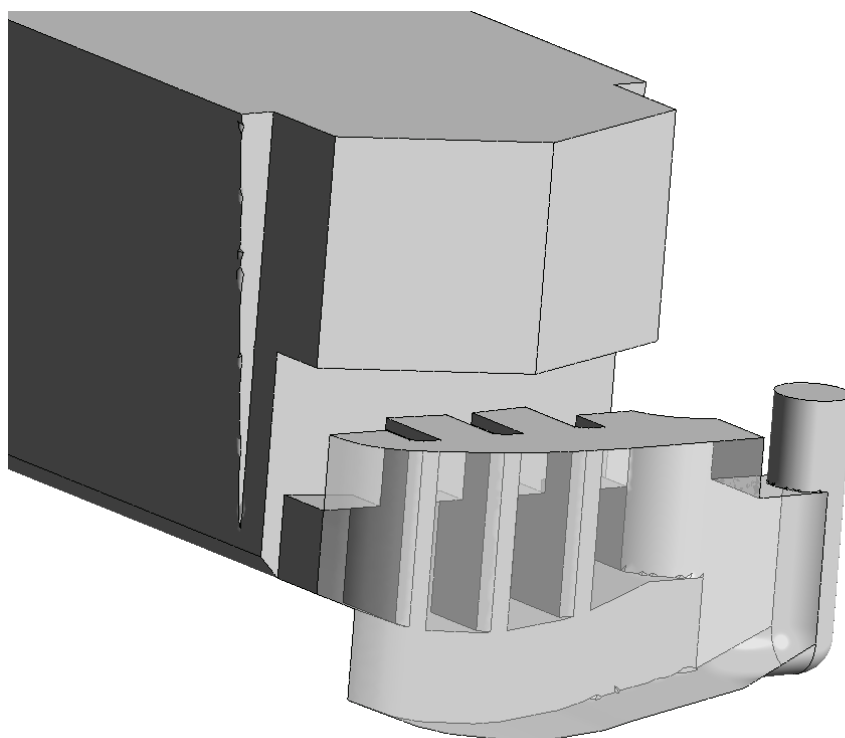
Obr. 39 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy

8.9. Návrh opatření

Výpočtem bylo zjištěno, že rychlosti na počátku užité délky v komoře výrazně převyšují bezpečnou mez, proto bylo navrženo několik variant opatření pro zmenšení těchto rychlostí. Geometrie byla opět vytvořena v programu Autocad 2018, následně importována do programu ICEM CFD 2019 R3, odkud byla geometrie a výpočetní síť exportována do programu ANSYS Fluent, kde proběhl výpočet. Pro lepší tlumení kinetické energie při podzáporníkovém plnění na plavební komoře Vnorovy I bylo navrženo: varianta 1 – prohloubení uklidňovací komory, varianta 2 – umístění usměrňovacích válců ve výtokových otvorech, varianta 3 – umístění usměrňovacích tyčí v uklidňovací komoře, varianta 4 – kombinace varianty 2 a 3. V dalších kapitolách jsou tyto jednotlivé varianty podrobněji popsány.

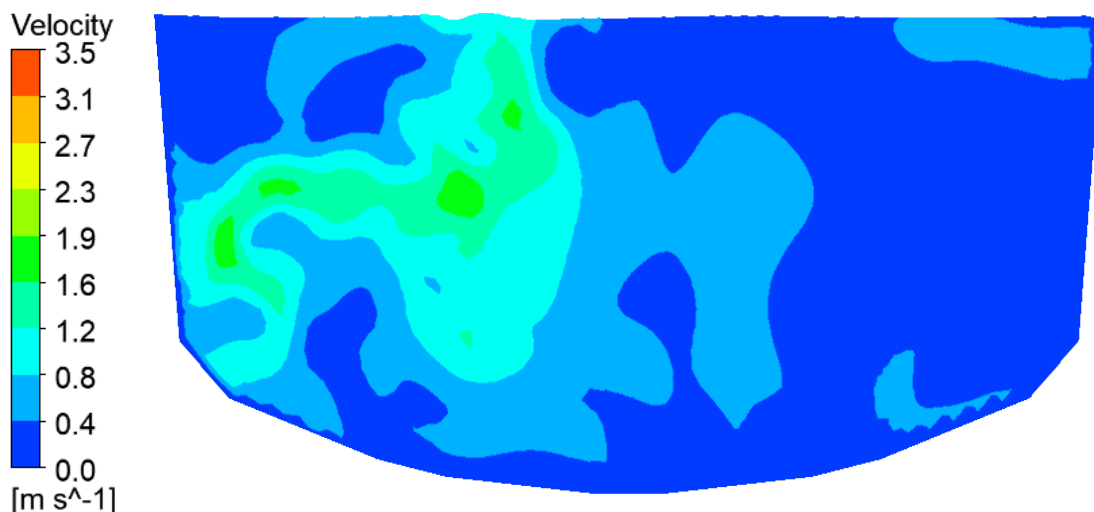
8.9.1. Varianta 1 – prohloubení uklidňovací komory

V této variantě byla prohloubena uklidňovací komora pod záporníkem horních vrat o 1,2 m. Prohloubení bylo navrženo rovné za svislými pilíři. Snahou u této varianty bylo, aby se proudění více uklidnilo ještě před vtokem do plavební komory. Na Obr. 40 je zobrazen pohled na vytvořenou geometrii plavební komory Vnorovy I s prohloubením uklidňovací komory pod záporníkem.



Obr. 40 – Návrh opatření – varianta 1 - prohloubení

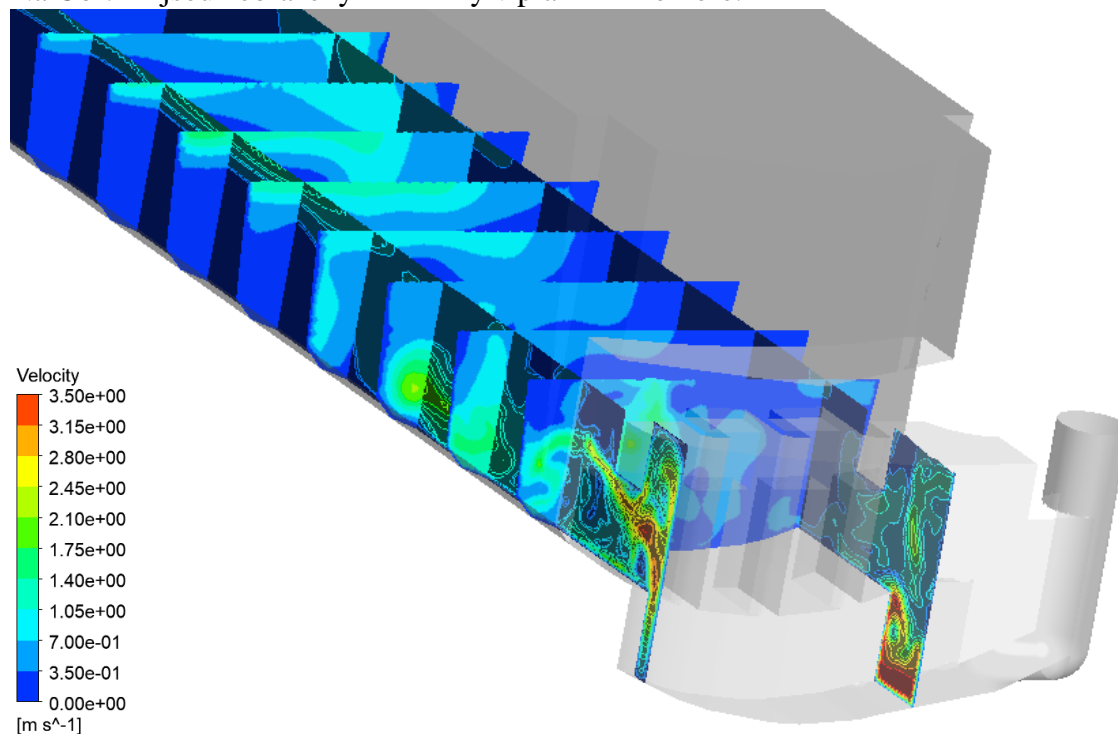
Na Obr. 41 je řez ve vzdálenosti 3,1 m od horních vrat se zobrazením rozdělení rychlostí.



Obr. 41 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 1

Maximální rychlost na počátku užité délky vychází u této varianty 2,1 m/s, tedy přibližně o 1,5 m/s menší. Rovněž vlnění hladiny na začátku plavební komory není tak výrazné. Stále však velká část průtoku vtéká do komory pouze levým oknem.

Na Obr. 42 jsou zobrazeny další řezy v plavební komoře.

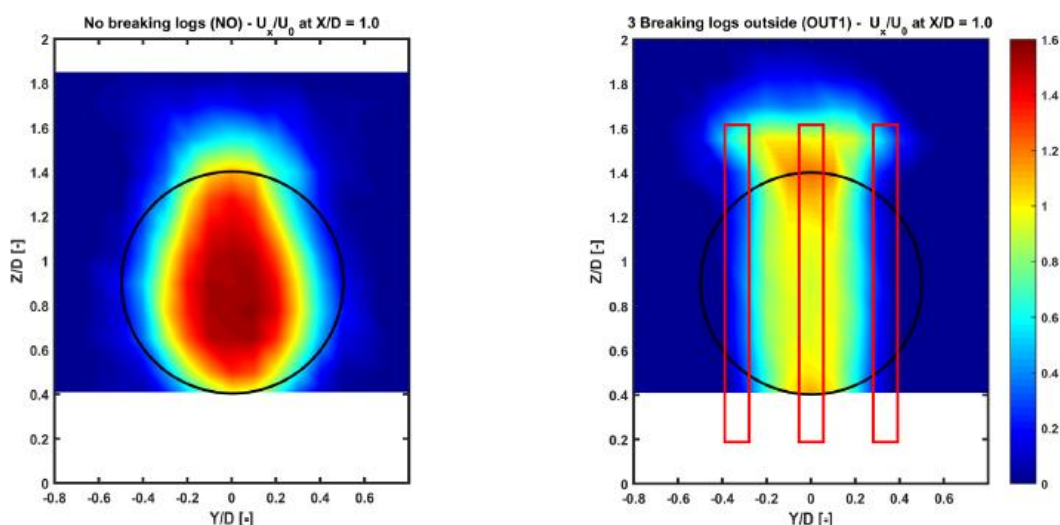


Obr. 42 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 1

8.9.2. Varianta 2 – usměrňovací válce

Inspirací pro tuto variantu byl Hydraulický výzkum plavební komory České Vrbné v roce 2008, který byl proveden na Katedře hydrotechniky na ČVUT v Praze. Na této komoře bylo rovněž navrženo plnění jednostranným krátkým obtokem. Pro lepší tlumení energie vody na přítoku do komory byly navrženy různé varianty, jednou z nich bylo umístění tří vodorovných kruhových profilů pod záporník horních vrat. [23]

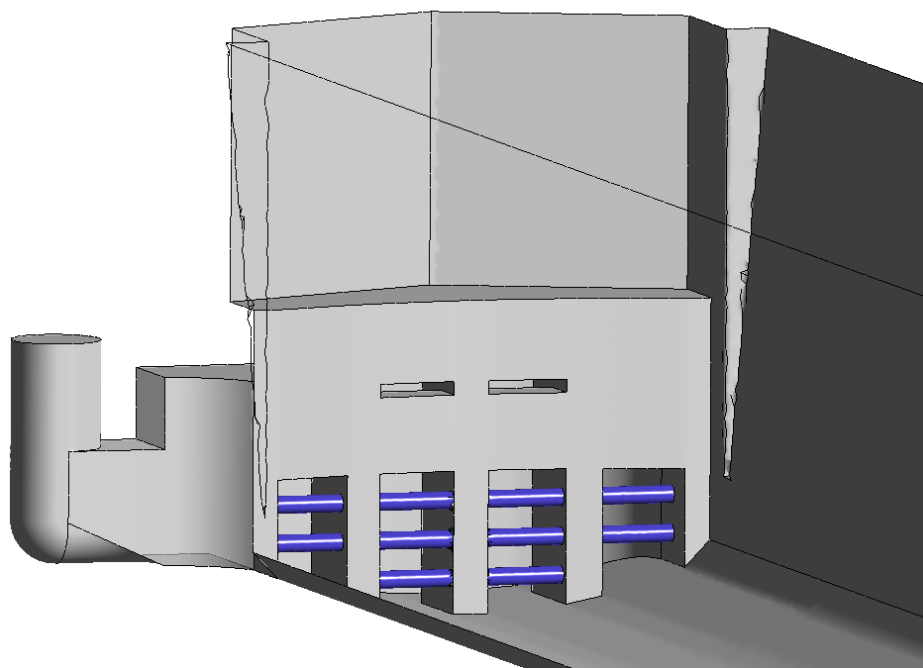
Podobného způsobu tlumení energie vody je užito například i u přímého plnění některých plavebních komor v Nizozemsku, kde proběhl výzkum umístění těchto tyčí ve vratech. Na Obr. 43 je na levé straně zobrazeno rychlostní pole pro kruhový profil, na pravé straně je zobrazen stejný profil s umístěním 3 vodorovných tyčí před tímto profilem. Podle legendy je patrné, že na pravé straně jsou výrazně menší rychlosti. [24]



Obr. 43 – Rozdělení rychlostí v kruhovém profilu [24]

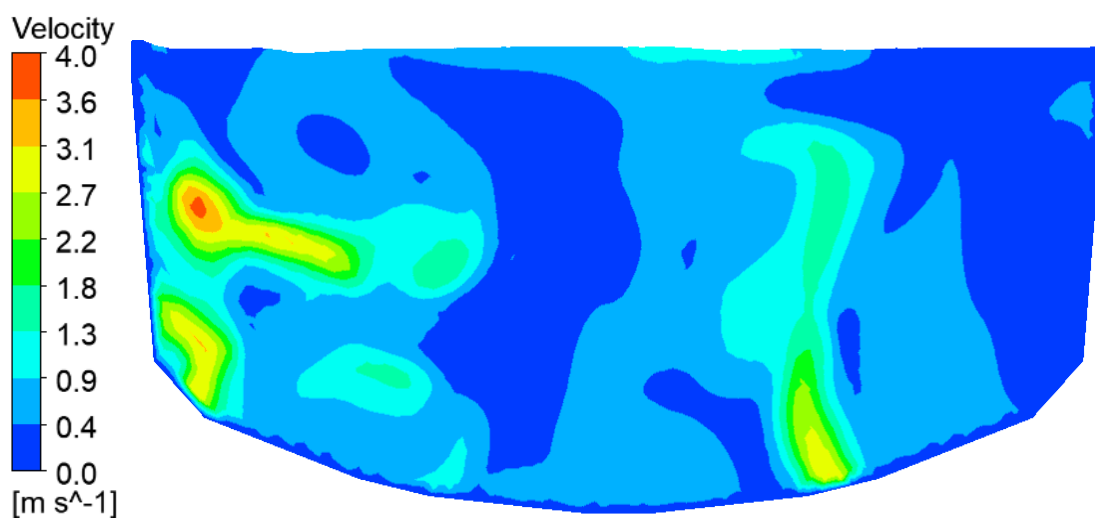
V našem případě se přímo pod záporníkem nachází výtoková okna z uklidňovací komory, a umístění tyčí před tato okna by vytvořilo překážku při proplavování, proto bylo navrženo umístění usměrňovacích válců přímo do vtokových oken. Průměr těchto válců byl navržen 20 cm, v prostředních dvou oknech byly umístěny 3 válce a v krajních dvou oknech byly umístěny 2 válce.

Umístění usměrňovacích válců je patrné z Obr. 44, kde jsou zobrazeny modrou barvou.



Obr. 44 – Návrh opatření – varianta 2 – usměrňovací válce

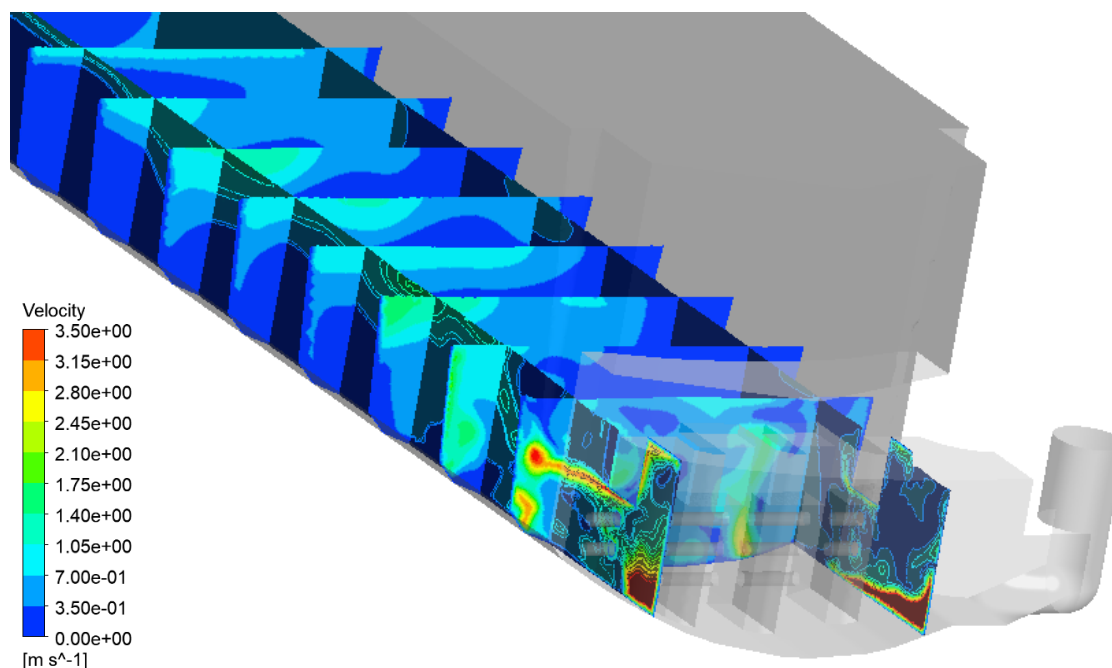
Na Obr. 45 je znázorněno rozdělení rychlostí v řezu při použití usměrňovacích válců.



Obr. 45 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 2

Maximální hodnota rychlosti v tomto řezu dosahuje hodnoty 3,93 m/s, to je dokonce více než v původním stavu. K této rychlosti dochází u levého okna nahoře, válce zde usměrněním proudu ke zvýšení rychlosti ještě přispěly. Zvlnění hladiny při této variantě je však menší.

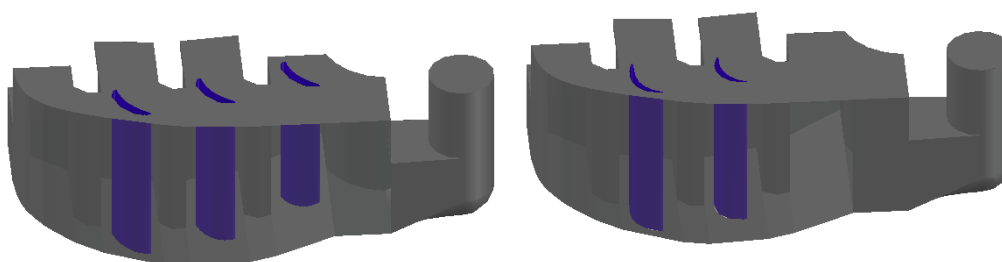
Na Obr. 46 jsou zobrazeny další řezy v plavební komoře.



Obr. 46 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 2

8.9.3. Varianta 3 – usměrňovací tyče

Při návrhu této varianty bylo cílem, co nejrovnoměrněji rozdělit průtok tak, aby každým výtokovým oknem protékalo přibližně stejně vody, tím by se měla snížit i rychlost na počátku užité délky plavební komory. Pro rozdělení byly navrženy usměrňovací tyče přímo v uklidňovací komoře. Předpokladem u této varianty je poměrně jednoduchá realizace těchto tyčí, která spočívá pouze v přidání těchto prvků do uklidňovací komory. Proběhla postupná optimalizace tvaru a natočení těchto tyčí. Tato optimalizace pro urychlení výpočtu proběhla na ustáleném dvoufázovém modelu pouze začátku plavební komory. Sít' byla vytvořena s ohledem na počet buněk do 512 000, tak aby výpočet nemusel být spuštěn na superpočítači. Na Obr. 47 vidíme vlevo počáteční a vpravo konečnou variantu návrhu.



Obr. 47 – Návrh opatření – varianta 3 – usměrňovací tyče

Nejdříve bylo navrženo přidání tří tyčí k prvním třem vtokovým oknům. Z analýzy proudnic u prvotních variant bylo zjištěno, že přidání tyče do prvního okna zcela zamezí proudu vtékání do druhého okna, proto v další fázi posouzení byly navrženy pouze dvě tyče v prostředních dvou oknech. Tyto tyče jsou široké v nejširším místě přibližně 15 cm a mají vhodný hydraulický tvar. Posouzení proběhlo v pěti variantách, poslední varianta byla shledána jako optimální.

V Tab. 22 jsou vypsané průtoky jednotlivými okny při optimalizaci tohoto rozdělení, varianta 0 odpovídá stávajícímu stavu, varianta 3-5 odpovídá nově navrženému konečnému stavu (na Obr. 45 vpravo). Okno 1 odpovídá oknu u pravého břehu, okno 4 odpovídá oknu u levého břehu.

Tab. 22 - Rozdělení průtoků mezi jednotlivá výtoková okna

okno	varianta					
	0	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
1	0.686	0.772	0.977	0.884	0.971	0.619
2	0.052	-0.028	0.357	0.209	0.381	0.500
3	0.193	0.622	0.718	0.617	0.797	0.643
4	1.243	1.020	0.564	0.786	0.391	0.539

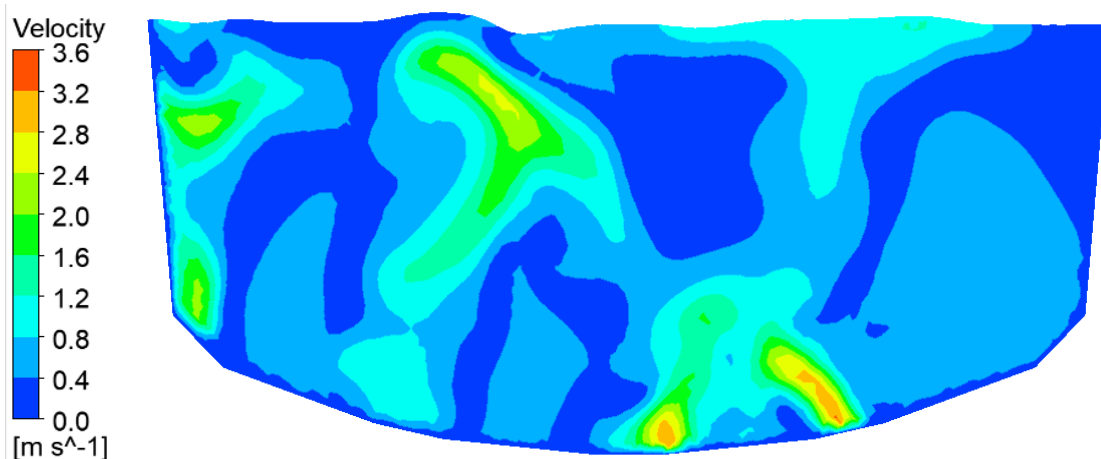
Následně byla vytvořena síť pro celou plavební komoru a byl proveden výpočet na již zmíněném superpočítači. Tento výpočet vykázal poměrově jiné hodnoty rozdělení průtoků pro tuto variantu i pro stávající stav. To mohlo být způsobeno jemností sítě a mírou ustálení modelu, která při výpočtu s hrubou sítí nebyla pravděpodobně dostatečně dosažena. V Tab. 23 jsou uvedeny hodnoty rozdělení průtoků jednotlivými okny z výpočtu pro variantu 3 s jemnou sítí.

Tab. 23 - Rozdělení průtoků mezi jednotlivá okna při použití jemné sítě

okno	varianta	
	0	3
	m ³ /s	m ³ /s
1	0.584	0.299
2	0.152	0.777
3	0.450	0.915
4	1.481	0.687

Dle Tab. 23 je patrné, že míra rovnoměrnosti rozdělení průtoků, nebyla dostatečně dosažena, je však lepší než u stávajícího stavu, kdy je neúměrně zatíženo především okno č. 4.

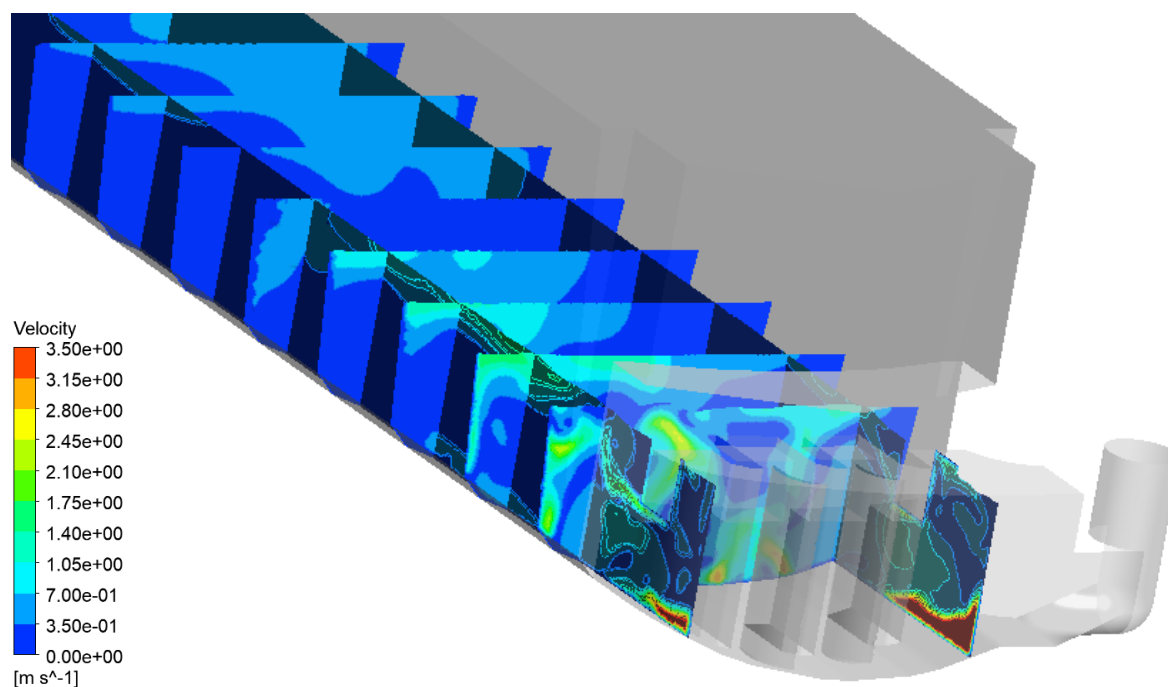
Na Obr. 48 je příčný řez komorou na počátku užité délky s patrným rozdělením rychlostí.



Obr. 48 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 3

Maximální rychlost v tomto řezu je rovna 3,60 m/s, této hodnoty je však dosaženo pouze lokálně u dna u druhého okna zprava. Plošně se vyskytují rychlosti kolem 2,00 m/s. Lze konstatovat, že rozdělení rychlostí je lepší než u stávajícího stavu.

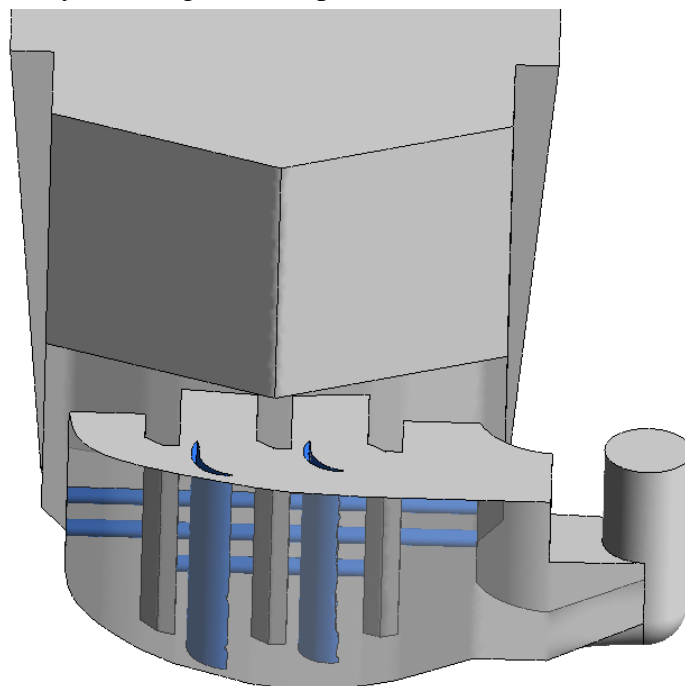
Na Obr. 49 je zobrazen pohled na plavební komoru s vytvořenými řezy.



Obr. 49 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 3

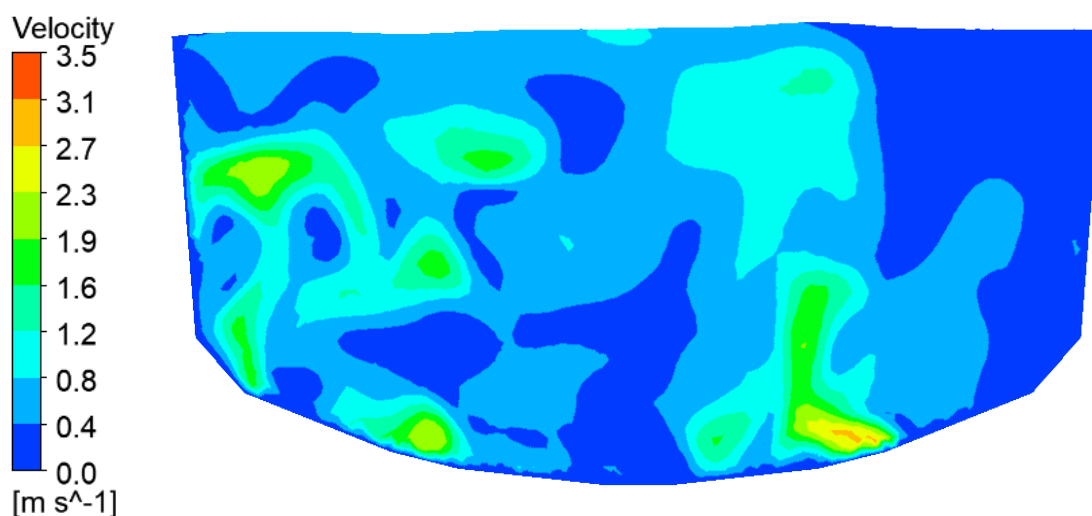
8.9.4. Varianta 4 – kombinace varianty 2 a varianty 3

V této variantě byla zkombinována varianta 2 a varianta 3, tedy usměrňovací válce ve výtokových oknech a usměrňovací tyče umístěné přímo v uklidňovací komoře. Na Obr. 50 je zobrazena vytvořená geometrie pro variantu 4.



Obr. 50 – Návrh opatření – varianta 4

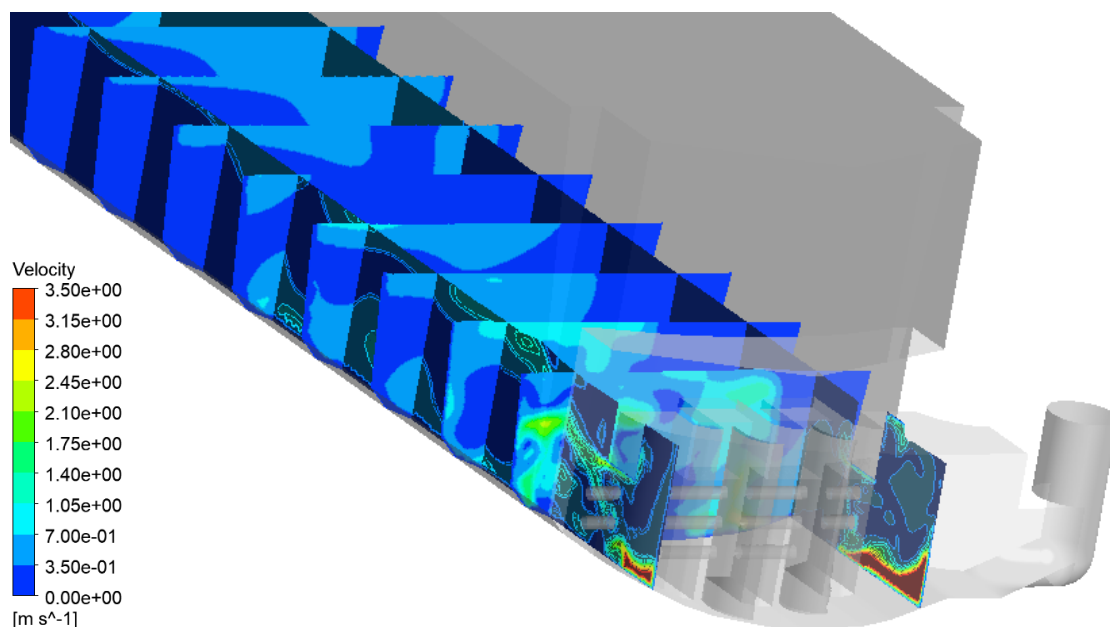
Na Obr. 51 je zobrazen příčný řez provedený ve stejných místech jako u předchozích variant.



Obr. 51 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 4

Z Obr. 51 je patrné rovnoměrnější rozdělení průtoku, rovněž maximální hodnota rychlosti je menší a nabývá hodnoty 3,18 m/s. Tato hodnota je dosaženo opět pouze lokálně u dna.

Na Obr. 52 je zobrazen pohled na plavební komoru s vytvořenými řezy.



Obr. 52 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 4

8.10. Porovnání jednotlivých variant

Z posuzovaných variant vykazuje nejlepší tlumení energie při plnění plavební komory Vnorovy I varianta 1 – prohloubení uklidňovací komory. Rychlosti na začátku plavební komory jsou zde nejmenší, zároveň je to ale varianta s největším zásahem do konstrukce uklidňovací komory, zahrnující podstatnou přestavbu. Jako druhá nejlepší varianta se ukázala varianta 4, tedy kombinace usměrňovacích válců a tyčí. Tato varianta představuje poměrně jednoduchý zásah do konstrukce.

V Tab. 24 je uvedeno rozdělení průtoků mezi jednotlivá výtoková okna z uklidňovací komory u všech posuzovaných variant.

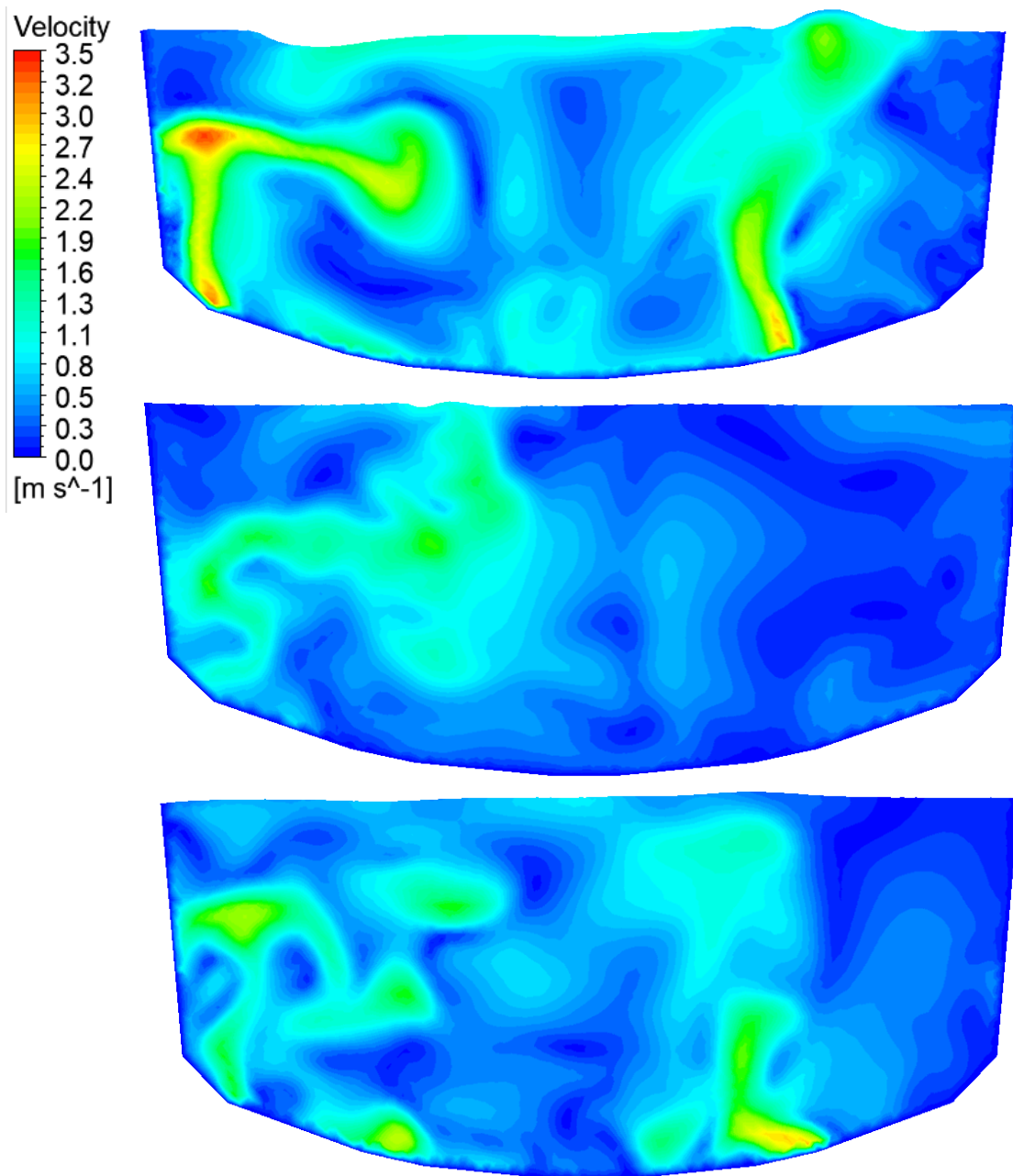
Tab. 24 - Rozdělení průtoků u výtokových oken a jednotlivých variant

okno	varianta				
	0	1	2	3	4
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
1	0.584	0.777	0.598	0.299	0.490
2	0.152	0.048	0.069	0.777	0.498
3	0.450	0.663	0.741	0.915	0.843
4	1.481	1.031	1.197	0.687	0.825

Nejlepší rozdělení průtoků vykazuje varianta číslo 4, kdy je průtok přibližně poměrově rozdělen na dvě a dvě okna.

Maximální rychlosti při plnění plavební komory u stávajícího stavu dosahují poměrně velkých hodnot, doba plnění plavební komory byla stanovena pouze odhadem, je tak možné, že skutečné rychlosti při proplavení jsou o něco menší.

Na Obr. 53 je pro přehlednost zobrazen řez na počátku užité délky z variant 0, 1 a 4. Řez varianty 0 je umístěn nahoře, varianty 1 uprostřed a řez z varianty 4 dole.



Obr. 53 – Řez na počátku užité délky plavební komory z varianty 0, 1 a 4

9. ZÁVĚR

V první části práce byly navrženy dvě varianty výškového umístění úsporných nádrží. U těchto variant byla určena potřeba vody pro proplavení. Potřeba vody u navržených nádrží činí přibližně 50 % u varianty 1 a přibližně 60 % u varianty 4 oproti původní potřebě vody. U varianty 1 při umístění nádrží nad sebou vyšla opravdu velmi malá hloubka vody při velké ploše úsporných nádrží. Proto by byla vhodnější varianta 4, kde vychází hloubka vody v nádržích přibližně 85 cm. U této varianty je možnost snadného přístupu k oběma úsporným nádržím a je tak umožněna kontrola a případná údržba. Výpočet ukázal, že i u menších plavebních komor je tato možnost úspory vody reálná. Problém při použití úsporných nádrží je prodloužení proplavovacího cyklu, které je u řešené plavební komory zřejmě nepřijatelné, jelikož i při stávajícím stavu zde proplavení trvá jednu z nejdelších dob proplavení na plavebních komorách na tomto kanále. Pro časovou kompenzaci plnění s využitím úsporných nádrží by byla třeba celková modernizace horního ohlaví včetně plnicího systému s důrazem na tlumení kinetické energie a ověřením řešení při matematickém a fyzikálním modelování.

V druhé části práce byl posouzen stávající stav při plnění plavební komory Vnorovy I. Výpočet ukázal, že na začátku užité délky plavební komory vznikají velké rychlosti, v některých místech hodnoty až dvakrát překračují doporučenou hodnotu. Proplavení tak může pro menší plavidla být nepříjemné až nebezpečné. Hodnoty jsou znatelně překročeny i přes to, že ve výpočtu na začátku této práce vyšly maximální síly v úvazných lanech s dostatečnou rezervou menší než doporučené maximální hodnoty. Z tohoto faktu vychází, že při návrhu plavební komory je třeba dávat velký pozor na plnění komory s ohledem na tlumení kinetické energie. Pro zmírnění těchto účinků bylo navrženo několik variant lepšího tlumení kinetické energie při plnění plavební komory. Jelikož se nejedná o návrh nové plavební komory, při návrhu opatření byla snaha o co nejmenší zásahy do stávající konstrukce. Jako nejlepší varianta se ukázala ta s prohloubením uklidňovací komory, tedy varianta 1. Tato varianta vykazovala nejmenší rychlosti na počátku užité délky, ale je zároveň nejsložitější z uvedených variant na realizaci. U žádné z uvedených variant však nedošlo k dosažení menších hodnot rychlostí na počátku plavební komory než maximálních doporučených. Modelování ukázalo poměrně velkou citlivost výpočtu na velikost elementů výpočetní sítě a s tím spojenou nutnost dalšího ověření s využitím fyzikálního modelování.

10. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Hodnocení ekonomické efektivnosti rekreační plavby na Bat'ově kanále: Marketingová analýza - ekonomické hodnocení*, zpracováno pro ŘVC ČR. SUDOP Praha, 2019.
- [2] CENEK, Pavel et.al. *Bat'ův kanál: od myšlenky k nápadu*. Brno: Povodí Moravy, 2018. ISBN 978-80-907141-0-6.
- [3] *Historie Bat'ova kanálu*, Bat'ův kanál [online]. [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.batacanal.cz/vodni-cesta/historie.html>
- [4] *Současnost Bat'ova kanálu*, Bat'ův kanál [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.batacanal.cz/vodni-cesta/soucasnost.html>
- [5] *Manipulační řád pro Vodní cestu řeky Moravy a průplavu Otrokovice - Rohatec - „Bat'ův kanál”: platnost do 31.12.2019*. Povodí Moravy, s.p., 2009, ročník 2009.
- [6] *Bat'ův kanál proplavil rekordní počet lodí*. Povodí Moravy, s.p. [online]. 2018 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/media/tiskove-zpravy/batuv-kanal-proplavil-rekordni-pocet-lodi/>
- [7] *Přístav Petrov*. Ředitelství vodních cest České republiky [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <http://www.rvccr.cz/pristavy-a-sluzby/pristav-petrov-na-batove-kanale>
- [8] *Český úřad zeměměřičský a katastrální. Geoportál ČÚZK*, Geoprohlížeč [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/>
- [9] *Mapový portál mapy.cz* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: www.mapy.cz
- [10] *Interní materiál Povodí Moravy*, s.p. Plavební komora Vnorovy I, 2019.
- [11] ČÁBELKA, Jaroslav. *Vodní cesty a plavba*. 2.přepřac. vyd. Praha: SNTL, 1976.
- [12] GABRIEL, Pavel a Vladimír MEDŘICKÝ. *Navrhování plavebních stupňů*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-00517-8.
- [13] *Vyhláška Ministerstva dopravy o vodních cestách, plavebním provozu v přístavech, společné havárii a dopravě nebezpečných věcí: Vyhláška č. 222/1995 Sb. v aktuálním znění, verze č.9*. In: Ministerstvo dopravy, 1995.
- [14] NOVAK, Pavel et al. *Hydraulic structures*. 4th ed. New York, 2007. ISBN 978-041-5386-258.
- [15] *Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Uelzen* [online]. [cit. 2019-11-31]. Dostupné z: <http://www.wsa-uelzen.wsv.de/wasserstrassen/bauwerke/index.html>

- [16] **ANSYS Fluent User's Guide** [online]. ANSYS, 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/flu_ug/flu_ug.html
- [17] KOZUBKOVÁ, Milada et al. **Matematické modely nestlačitelného a stlačitelného proudění: metoda konečných objemů**. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. ISBN 80-707-8709-0.
- [18] KAŠPAR, Tomáš. **Matematické modely turbulence**. České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, katedra hydrotechniky, 2017.
- [19] MATOUŠEK, Václav. **Výukové materiály pro předmět Hydraulika 3 pro magisterské studium - přednášky**. In: ČVUT v Praze, fakulta stavební [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/MujWeb_soubory/Page437.htm
- [20] **Technické vybavení superpočítání** [online]. ČVUT - Výpočetní a informační centrum [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://ist.cvut.cz/nase-sluzby/superpocitani/superpocitani-technika/>
- [21] **ANSYS ICEM CFD User's Manual** [online]. ANSYS [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/icm_user/icm_user.html
- [22] HORÁKOVÁ, Kateřina et al. **Manuál pro výuku numerických metod** [online]. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní, katedra energetických zařízení [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <http://www.kez.tul.cz/files/manual-pro-vyuku-numerickych-metod-web.pdf>
- [23] Propagační materiál Katedry hydrotechniky, ČVUT v Praze, Fakulta stavební: **Hydraulický výzkum plavební komory České Vrbné, Posouzení a optimalizace plnění a prázdnění plavební komory**. 2008.
- [24] KRISTOF, Verelst et al. **Experimental investigation of the influence of breaking logs on the flow patterns induced by lock fill with gate openings**. Flanders Hydraulics Research, Universiteit Gent, 2017.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Průběh vodní cesty [1].....	5
Obr. 2 - Podélný profil vodní cesty[1]	8
Obr. 3 - Pohled na dolní rejdu plavební komory Vnorovy II	9
Obr. 4 - Počet proplavení plavební komorou Vnorovy II v červenci 2016 [1].....	10
Obr. 5 – Přístav Petrov [7]	11
Obr. 6 - Situace širších vztahů [8]	12
Obr. 7 - Situace s vyznačením důležitých prvků [9].....	12
Obr. 8 - Odbočení části toku	13
Obr. 9 - Stavidla regulující hladinu v jižní části kanálu	14
Obr. 10 - Torzo bývalé lodní lanovky.....	14
Obr. 11 - Pohled na horní vrata plavební komory Vnorovy I.....	15
Obr. 12 - Pohled na vtokové okno do obtoku [10]	15
Obr. 13 - Pohled na dolní vrata z dolní rejdy.....	16
Obr. 14 - Dolní vrata plavební komory Vnorovy I.....	16
Obr. 15 - Pohled na plavební komoru Vnorovy II.....	17
Obr. 16 - Horní vrata plavební komory Vnorovy II	18
Obr. 17 - Pohled na dolní vrata z dolní rejdy.....	18
Obr. 18 - Plavební komora Vnorovy II s otočným mostem.....	19
Obr. 19 - Schéma pro výpočet plnění a prázdnění plavebních komor [11]	20
Obr. 20 - Schéma znázorňující síly na uvázané plavidlo [12]	24
Obr. 21 - Schéma pro výpočet příčných ploch [12].....	26
Obr. 22 - Průběh plnění plavební komory Vnorovy I.....	30
Obr. 23 - Průběh prázdnění plavební komory Vnorovy I	32
Obr. 24 - Průběh plnění plavební komory Vnorovy II.....	33
Obr. 25 - Průběh prázdnění plavební komory Vnorovy II.....	35
Obr. 26 - Schéma pro výpočet potřeby vody[11]	36
Obr. 27 - Schéma pro výpočet úsporných nádrží [11]	39
Obr. 28 - Plavební komora Hohenwarthe s úspornými nádržemi [15].....	40
Obr. 29 - Plavební komora Sülfeld s úspornými nádržemi [15].....	40
Obr. 30 - Provozní budova pro obsluhu plavební komory Vnorovy I.....	45
Obr. 31 – Základní rozhraní programu ANSYS Fluent.....	54

Obr. 32 – Vygenerovaná síť plavební komory Vnorovy I.....	55
Obr. 33 – Okrajové podmínky výtoku z modelu	57
Obr. 34 – Průběh reziduí, přítoku a odtoku	59
Obr. 35 – Pohled na komoru s vyznačenou hladinou	60
Obr. 36 – Pohled na hladinu při plnění plavební komory.....	60
Obr. 37 – Průběh hladiny na počátku užité délky	61
Obr. 38 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu na počátku užité délky	62
Obr. 39 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy	62
Obr. 40 – Návrh opatření – varianta 1 - prohloubení.....	63
Obr. 41 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 1	64
Obr. 42 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 1	64
Obr. 43 – Rozdělení rychlostí v kruhovém profilu[24]	65
Obr. 44 – Návrh opatření – varianta 2 – usměrňovací válce	66
Obr. 45 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 2	66
Obr. 46 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 2	67
Obr. 47 – Návrh opatření – varianta 3 – usměrňovací tyče	67
Obr. 48 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 3	69
Obr. 49 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 3	69
Obr. 50 – Návrh opatření – varianta 4	70
Obr. 51 – Rozdělení rychlostí v příčném řezu – varianta 4	70
Obr. 52 – Pohled na komoru s vytvořenými řezy – varianta 4	71
Obr. 53 – Řez na počátku užité délky plavební komory z varianty 0, 1 a 4	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Průměrný počet proplavení plavebními komorami na Baťově kanálu [6].....	10
Tab. 2 - Charakteristiky plavidla pro vodní cestu třídy 0 [13].....	28
Tab. 3 - Vstupní údaje pro výpočet plnění plavební komory Vnorovy I.....	29
Tab. 4 - Výsledné hodnoty při plnění plavební komory Vnorovy I.....	30
Tab. 5 - Vstupní údaje pro výpočet prázdnění plavební komory Vnorovy I.....	31
Tab. 6 - Výsledné hodnoty prázdnění plavební komory Vnorovy I.....	31
Tab. 7 - Vstupní údaje pro výpočet plnění plavební komory Vnorovy II.....	32
Tab. 8 - Výsledné hodnoty plnění plavební komory Vnorovy II.....	33
Tab. 9 - Vstupní údaje pro výpočet prázdnění plavební komory Vnorovy II.....	34
Tab. 10 - Výsledné hodnoty prázdnění plavební komory Vnorovy II.....	34
Tab. 11 - Parametry plavební komory a vypočtená potřeba vody pro proplavení.....	38
Tab. 12 - Parametry plavební komory a vypočtená potřeba vody pro proplavení.....	38
Tab. 13 - Výsledné hodnoty výpočtu úsporných nádrží u plavební komory Vnorovy I.....	44
Tab. 14 – Nadmořské výšky při plnění plavební komory s úspornými nádržemi.....	46
Tab. 15 – Nadmořské výšky při prázdnění plavební komory s úspornými nádržemi	46
Tab. 16 - Doba plnění komory s úspornými nádržemi – varianta 1.....	47
Tab. 17 - Doba prázdnění komory s úspornými nádržemi – varianta 1.....	47
Tab. 18 – Nadmořské výšky při plnění plavební komory s úspornými nádržemi.....	48
Tab. 19 – Nadmořské výšky při prázdnění plavební komory s úspornými nádržemi	49
Tab. 20 - Doba plnění komory s úspornými nádržemi – varianta 4.....	49
Tab. 21 - Doba prázdnění komory s úspornými nádržemi – varianta 4.....	50
Tab. 22 - Rozdělení průtoků mezi jednotlivá výtoková okna.....	68
Tab. 23 - Rozdělení průtoků mezi jednotlivá okna při použití jemné sítě.....	68
Tab. 24 - Rozdělení průtoků u výtokových oken a jednotlivých variant.....	71

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkres plavební komory Vnorovy I – půdorys

Příloha 2 – Výkres plavební komory Vnorovy I – podélný řez

Příloha 3 – Výkres plavební komory Vnorovy I – řezy komorou

Příloha 4 – Výkres plavební komory Vnorovy II – půdorys

Příloha 5 – Výkres plavební komory Vnorovy II – podélný řez

Příloha 6 – Situace posuzovaných variant umístění úsporných nádrží

Příloha 7 – Výsledné hodnoty návrhu jednotlivých variant výpočtu úsporných nádrží

Příloha 8 – Návrh úsporných nádrží – varianta 1, schématický půdorys a řez

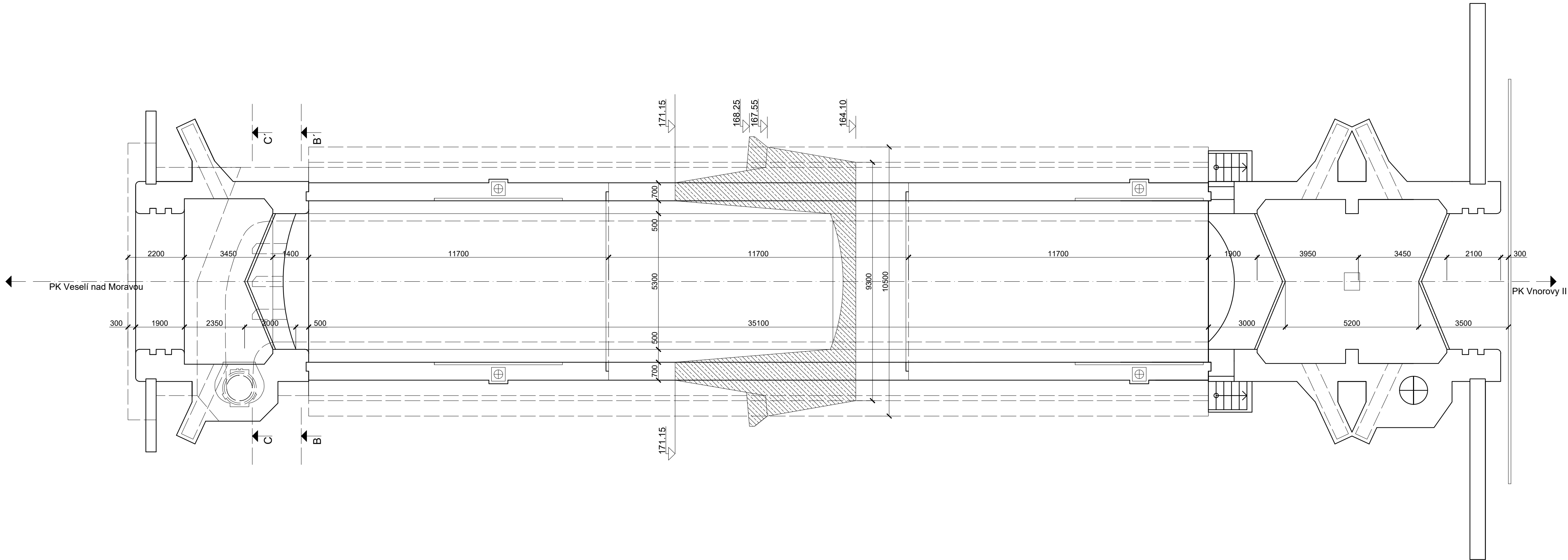
Příloha 9 – Návrh úsporných nádrží – varianta 4, schématický půdorys a řez


Příloha 10 – 3D model plavební komory

Příloha 11 – 3D model plavební komory - uklidňovací komora

PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I - km 13,23

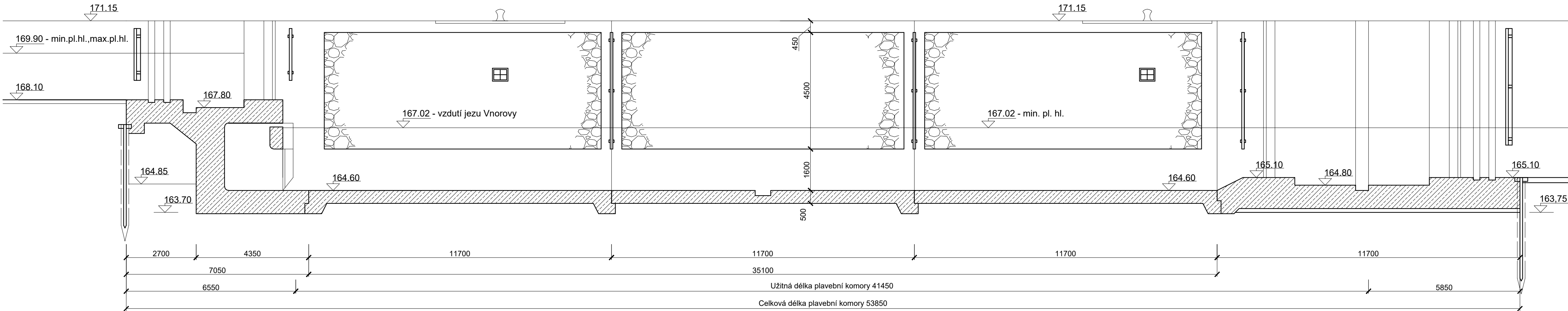
PŮDORYS




ZPRACOVALA: Bc. VERONIKA MORAVOVÁ		VEDOUcí PRÁCE: doc. Dr. Ing. PAVEL FOŠUMPAUR	FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT 	
NÁZEV PRÁCE: OPTIMALIZACE PROVOZNÍHO REŽIMU PK VNOROVY I A VNOROVY II			DATUM MĚŘÍTKO	01/2020 1: 100
VÝKRES: PK VNOROVY I - PŮDORYS			PŘÍLOHA	1

PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I - km 13,23

PODÉLNÝ ŘEZ

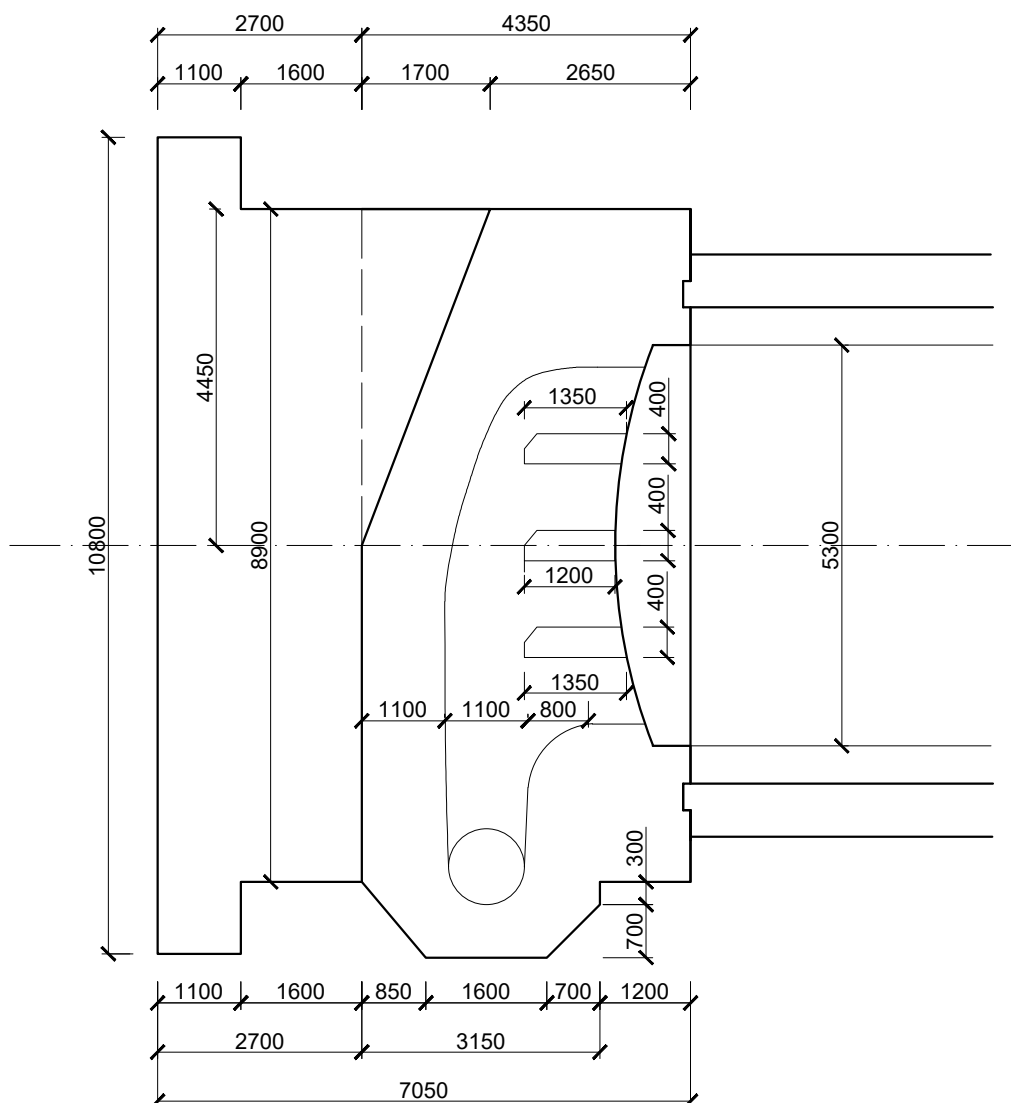


ZPRACOVALA: Bc. VERONIKA MORAVOVÁ	VEDOUcí PRÁCE: doc. Dr. Ing. PAVEL FOŠUMPAUR	FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT 	
NÁZEV PRÁCE: OPTIMALIZACE PROVOZNIHO REŽIMU PK VNOROVY I A VNOROVY II		DATUM MĚŘITKO	01/2020 1: 100
VÝKRES: PK VNOROVY I - PODÉLNÝ ŘEZ		PŘÍLOHA Č.	2

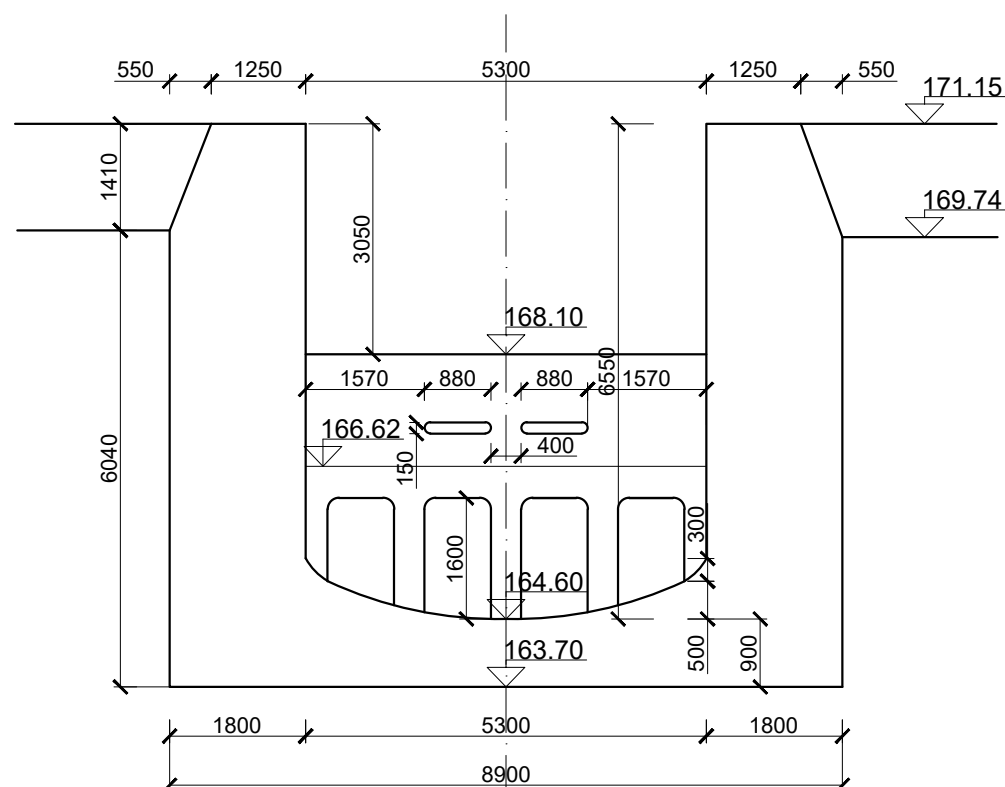
PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I - km 13,23

ŘEZY

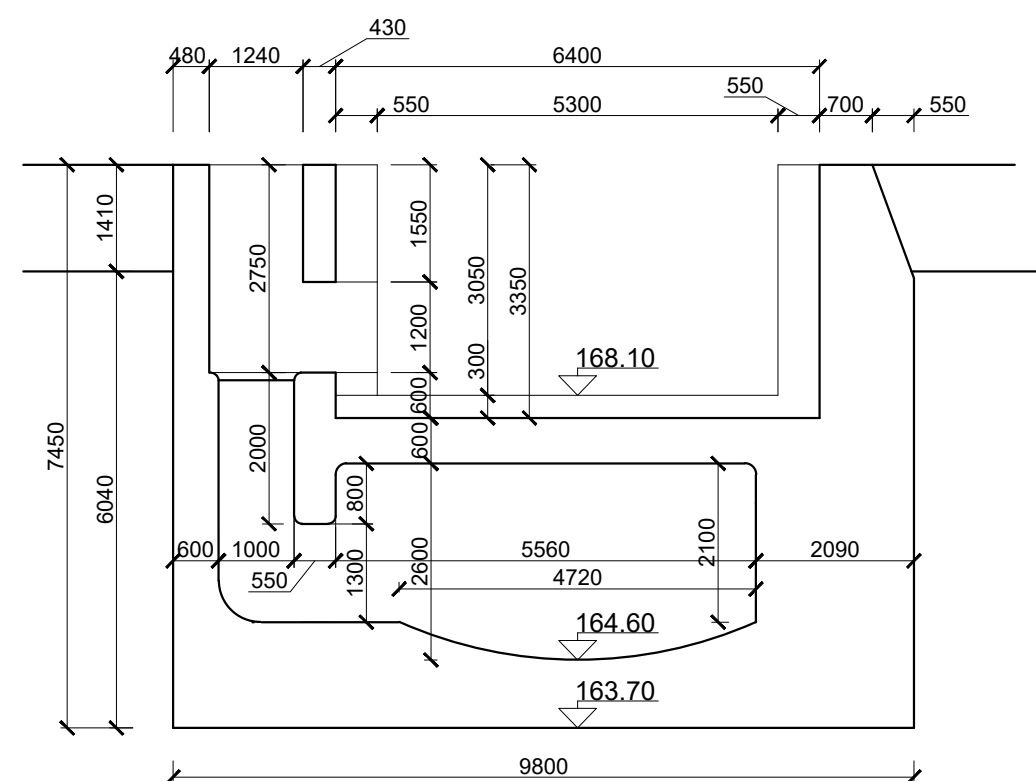
ŘEZ A-A'




ŘEZ B-B'

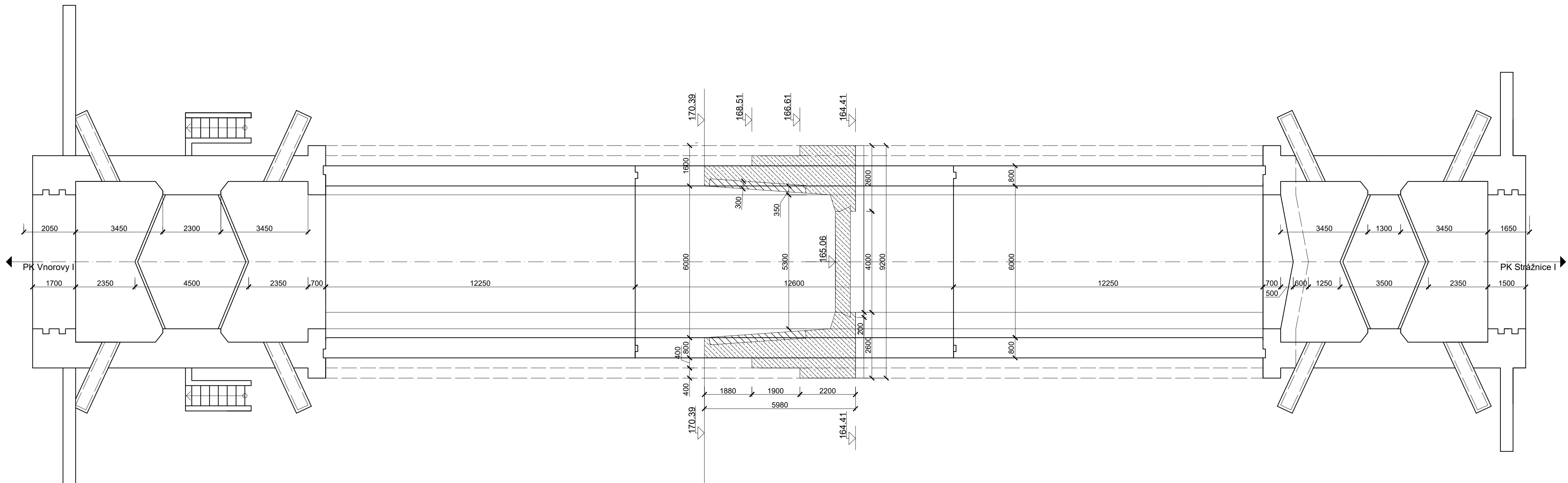



ŘEZ C-C



ZPRACOVÁLA:		VEDOUcí PRÁCE:		FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT 	
Bc. VERONIKA MORAVOVÁ		doc. Dr. Ing. PAVEL FOŠUMPAUR			
NÁZEV PRÁCE:				DATUM 01/2020	
OPTIMALIZACE PROVOZNIÍHO REŽIMU PK VNOROVY I A VNOROVY II				MĚŘITKO 1: 100	
VÝKRES:				PŘÍLOHA Č.	
PK VNOROVY I - ŘEZY				3	

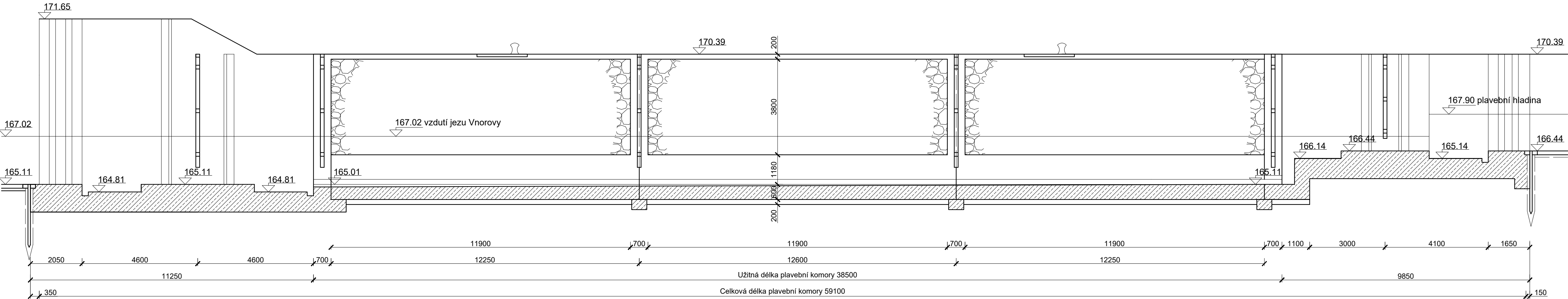
PŮDORYS




ZPRACOVAVALA: Bc. VERONIKA MORAVOVÁ		VEDOUČÍ PRÁCE: doc. Dr. Ing. PAVEL FOŠUMPAUR		FAKULTA STAVEBNÍ 	
NÁZEV PRÁCE: OPTIMALIZACE PROVOZNIHO REŽIMU PK VNOROVY I A VNOROVY II				DATUM	01/2020
				MĚŘITKO	1: 100
VÝKRES: PK VNOROVY II - PŮDORYS				PŘÍLOHA Č.	4

PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY II - km 12,99

PODÉLNÝ ŘEZ



ZPRACOVALA: Bc. VERONIKA MORAVOVÁ		VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Dr. Ing. PAVEL FOŠUMPAUR	FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT 	
NÁZEV PRÁCE: OPTIMALIZACE PROVOZNÍHO REŽIMU VNOROVY I A VNOROVY II			DATUM 01/2020	MĚŘÍTKO 1: 100
VÝKRES: PK VNOROVY II - PODÉLNÝ ŘEZ			PŘÍLOHA Č.	5

PŘÍLOHA Č.6 - NÁVRH ÚSPORNÝCH NÁDRŽÍ - PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I
SITUACE POSUZOVANÝCH VARIANT UMÍSTĚNÍ ÚSPORNÝCH NÁDRŽÍ

VARIANTA 1



VARIANTA 2



VARIANTA 3



VARIANTA 4

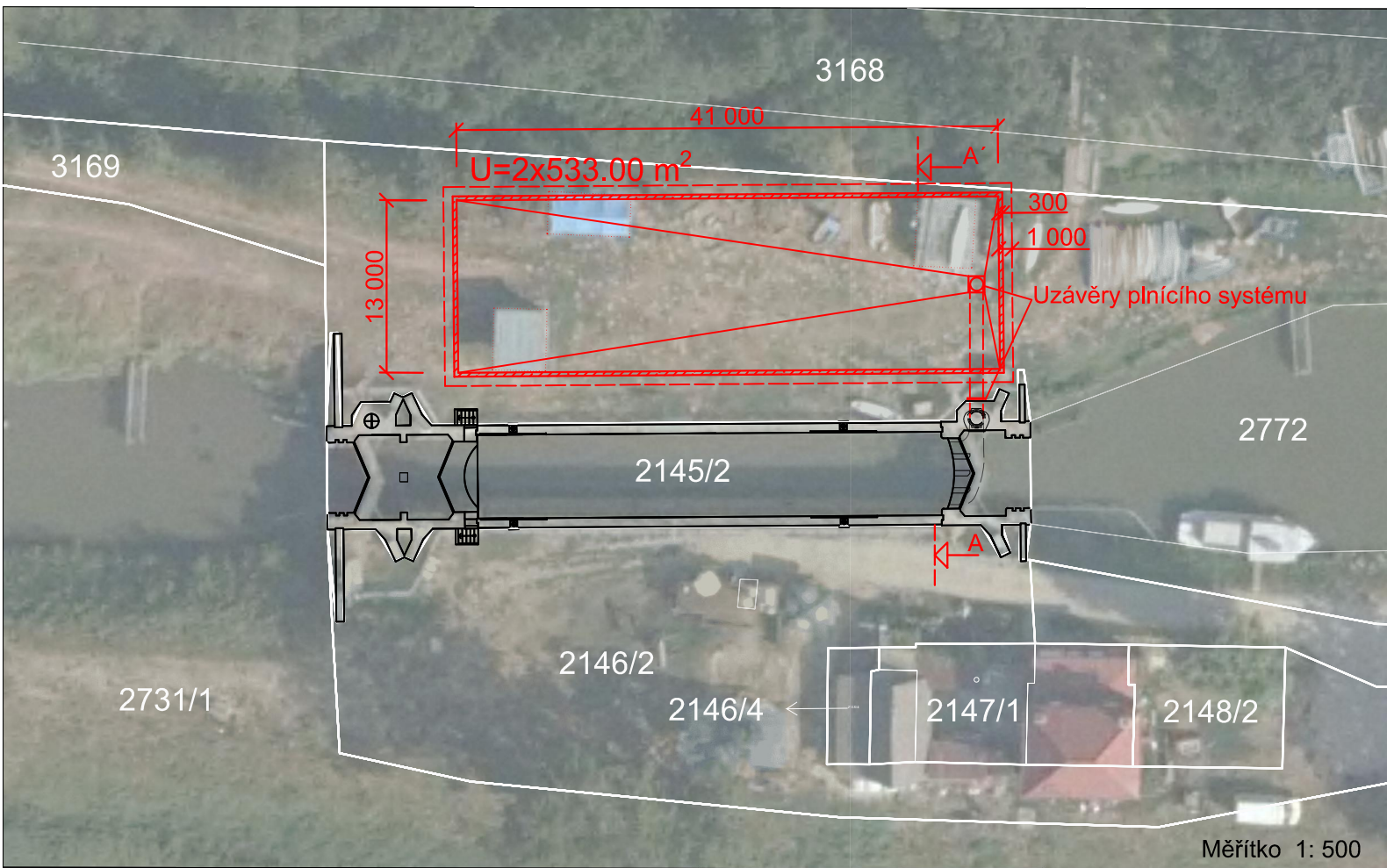


Příloha č. 7 - Návrh úsporných nádrží - plavební komora Vnorovy I

	Varianta 1				Varianta 2				Varianta 3				Varianta 4					
n	3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6	-	počet vrstev
k	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	-	počet nádrží
e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m	zbytková výška do úplného vyrovnání hladin
U	285.06	285.06	285.06	285.06	142.54	142.54	142.54	142.54	430.07	430.07	430.07	430.07	215.04	215.04	215.04	215.04	m ²	plocha hladiny úsporných nádrží
F	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	285.06	m ²	plocha hladiny plavební komory
m	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	1.51	1.51	1.51	1.51	0.75	0.75	0.75	0.75	-	poměr ploch úsporných nádrží a plavební komory
h	0.96	0.72	0.58	0.48	1.44	1.15	0.96	0.82	0.72	0.52	0.41	0.34	1.15	0.85	0.72	0.60	m	hloubka vody v úsporných nádržích
t	0.96	0.72	0.58	0.48	0.72	0.58	0.48	0.41	1.08	0.79	0.62	0.51	0.87	0.64	0.54	0.46	m	výška vrstvy v plavební komoře
v	1.92	1.44	1.15	0.96	2.16	1.73	1.44	1.23	1.80	1.31	1.03	0.85	2.01	1.59	1.26	1.06	m	zbylá výška v plavební komoře, kterou je nutno dopouštět
V₁	667.32	530.49	448.39	153.66	735.73	612.58	530.48	231.84	632.66	492.70	412.77	121.07	694.11	574.57	478.51	181.83	m ³	potřeba vody pro jednotlivé proplavení z horní zdrže do dolní
V₁	427.32	290.49	208.39	153.66	495.73	372.58	290.48	231.84	392.66	252.70	172.77	121.07	454.11	334.57	238.51	181.83	m ³	potřeba vody pro jednotlivé proplavení z dolní zdrže do horní
V₂	273.66	205.24	164.19	136.83	307.86	246.29	205.24	175.92	256.33	186.35	146.38	120.53	287.06	227.28	179.25	150.92	m ³	potřeba vody pro obousměrné pravidelné proplavování
V₃	410.49	307.86	246.29	205.24	461.79	369.43	307.86	263.88	384.50	279.52	219.58	180.80	430.58	340.93	268.88	226.38	m ³	potřeba vody při nepravidelném proplavování
V_{u1}	393.66	530.49	612.58	667.32	325.25	448.39	530.49	589.13	428.31	568.27	648.20	699.90	366.86	486.40	582.46	639.14	m ³	úspora vody pro jednotlivé proplavení z horní zdrže do dolní
V_{u1}	153.66	290.49	372.58	427.32	85.25	208.39	290.49	349.13	188.31	328.27	408.20	459.90	126.86	246.40	342.46	399.14	m ³	úspora vody pro jednotlivé proplavení z dolní zdrže do horní
V_{u2}	547.32	820.97	985.17	1094.63	410.49	656.79	820.98	938.26	616.62	896.55	1056.41	1159.81	493.72	732.81	924.93	1038.28	m ³	úspora vody pro obousměrné pravidelné proplavování
V_{u3}	410.49	615.73	738.88	820.97	307.87	492.59	615.74	703.70	462.46	672.41	792.31	869.86	370.29	549.61	693.70	778.71	m ³	úspora vody při nepravidelném proplavování

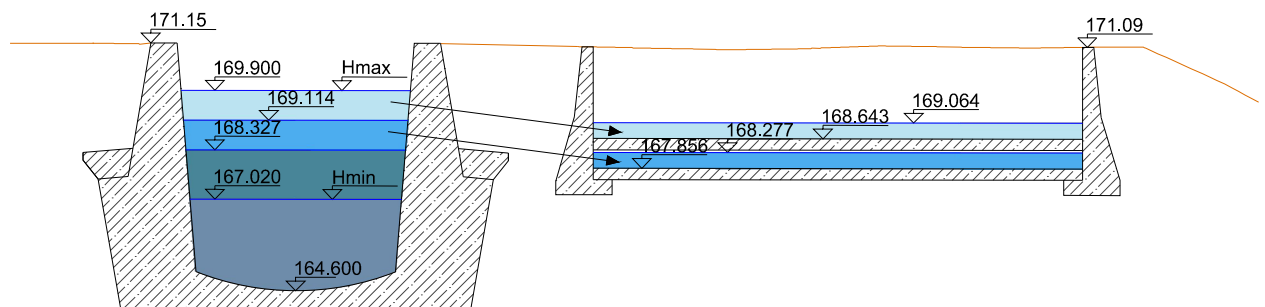
Příloha č.8 - Návrh úsporných nádrží - varianta 1

Schematický půdorys a řez - PK Vnorovy I

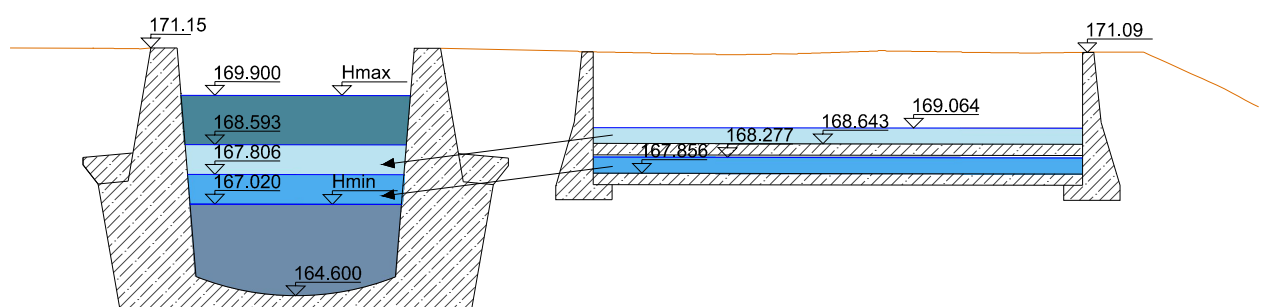


Řez A-A'

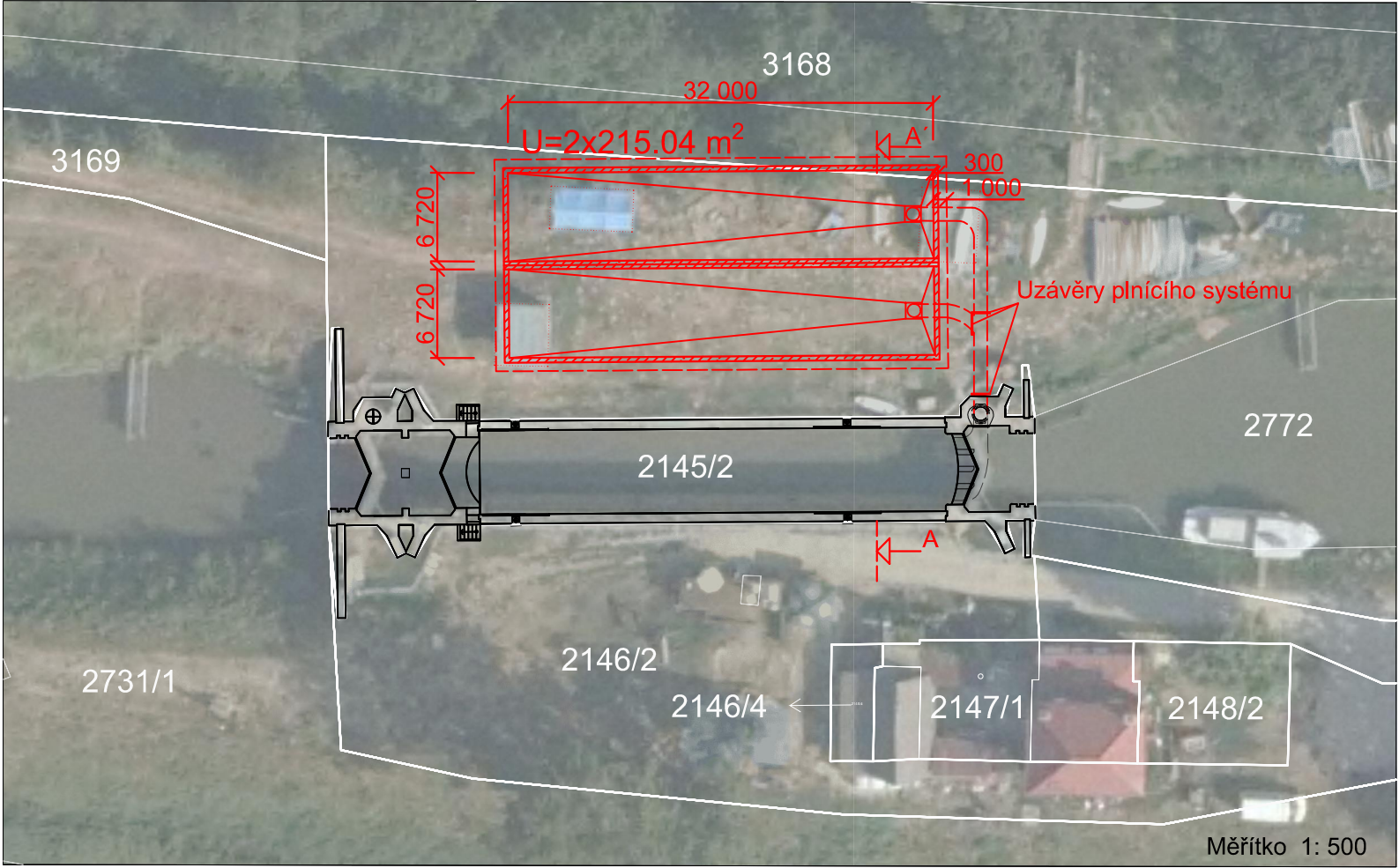
Prázdňení plavební komory



Plnění plavební komory

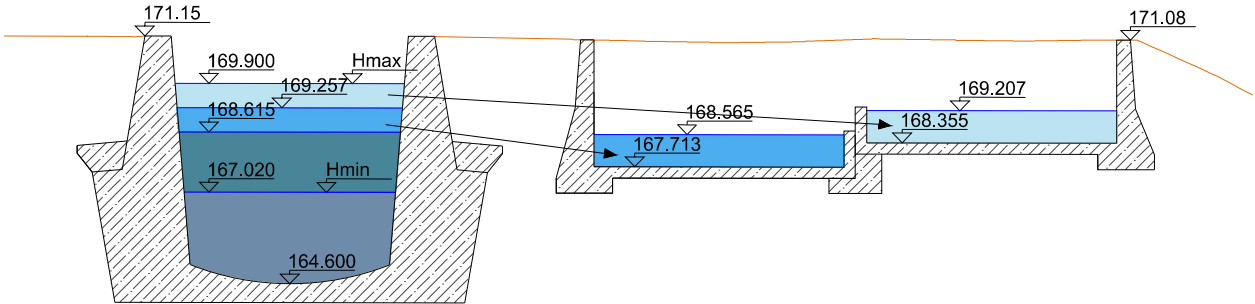


Příloha č.9- Návrh úsporných nádrží - varianta 4
Schematický půdorys a řez - PK Vnorovy I

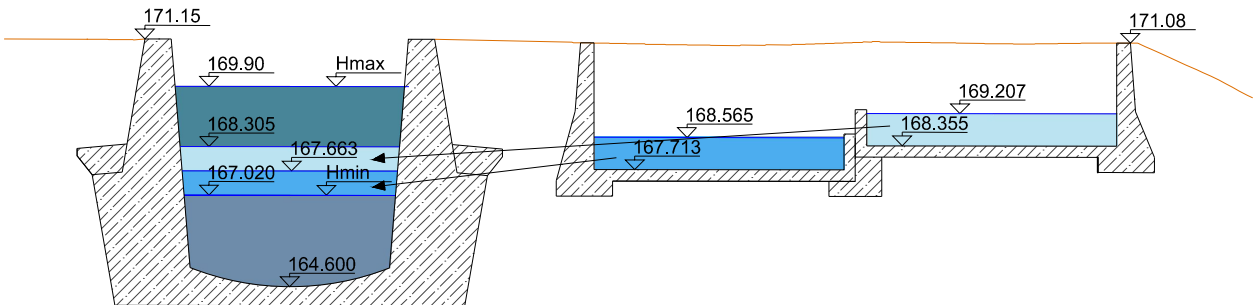


Řez A-A'

Prázdňení plavební komory

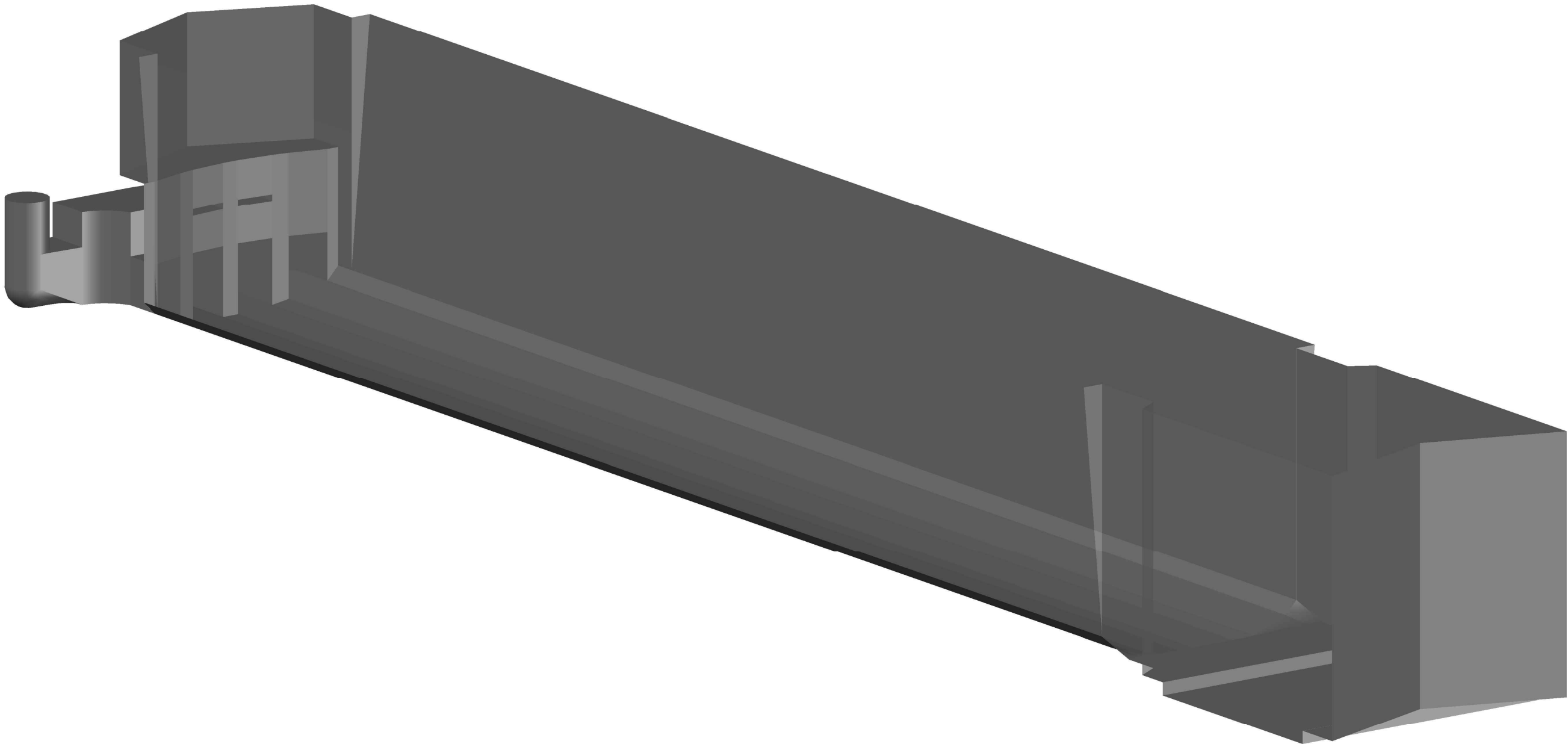


Plnění plavební komory



PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I - km 13,23

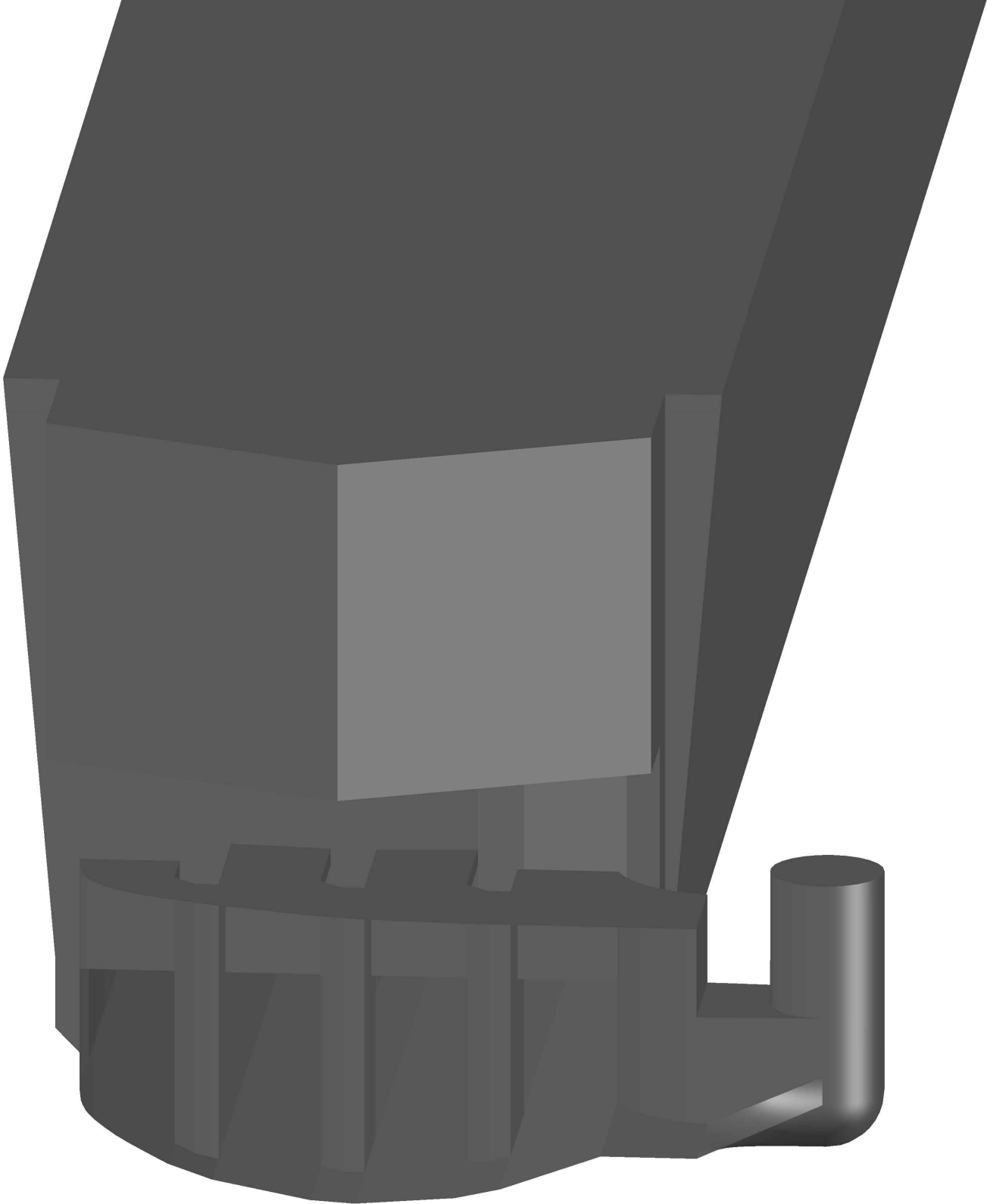
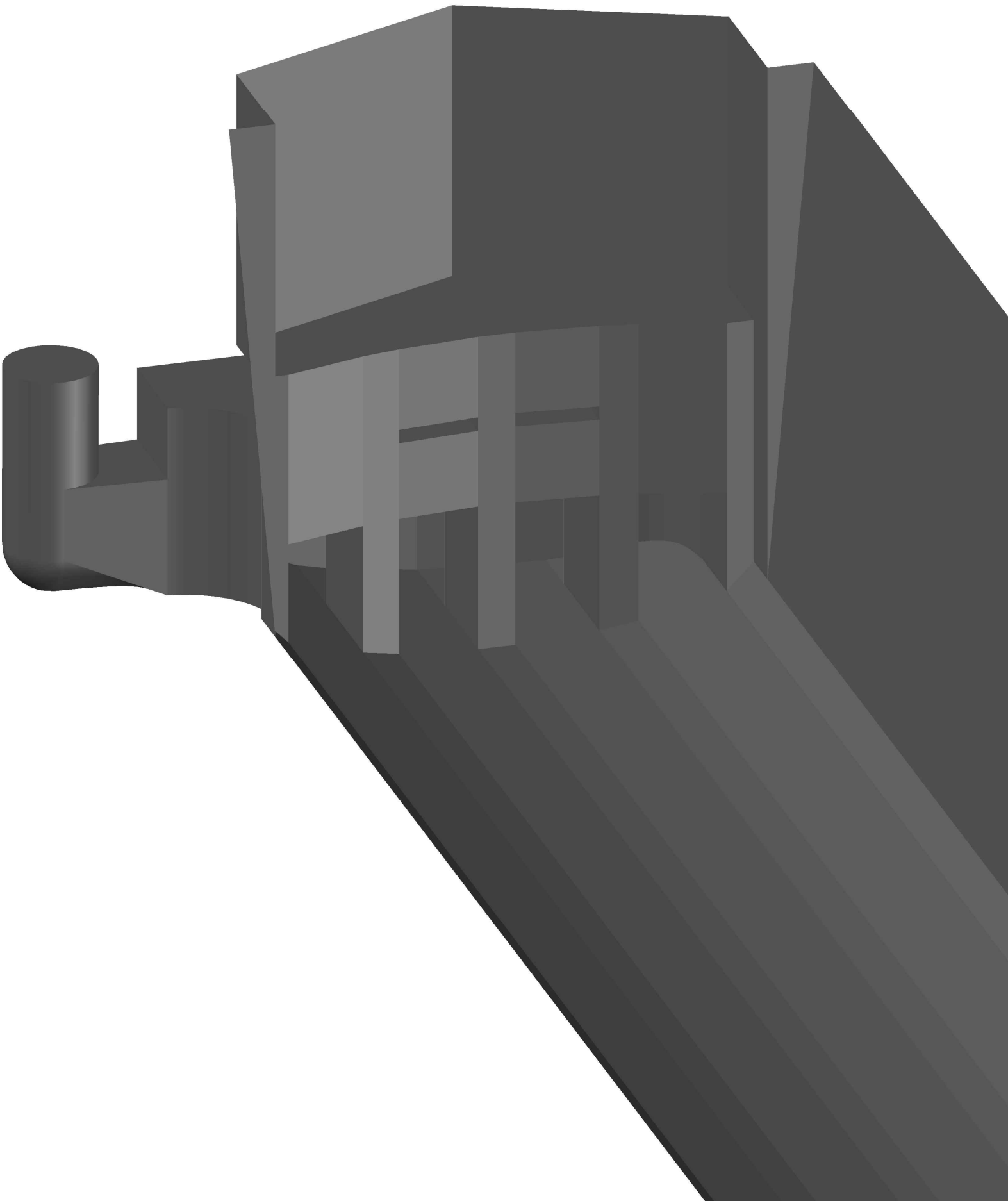
3D MODEL




ZPRACOVALA: Bc. VERONIKA MORAVOVÁ	VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Dr. Ing. PAVEL FOŠUMPAUR	FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT	
NÁZEV PRÁCE: OPTIMALIZACE PROVOZNÍHO REŽIMU PK VNOROVY I A VNOROVY II		DATUM	01/2020
		MĚŘÍTKO	
VÝKRES: PK VNOROVY I - 3D MODEL		PŘÍLOHA Č.	10

PLAVEBNÍ KOMORA VNOROVY I - km 13,23

3D MODEL - UKLIDŇOVACÍ KOMORA



ZPRACOVALA: Bc. VERONIKA MORAVOVÁ	VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Dr. Ing. PAVEL FOŠUMPAUR	FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT 	
NÁZEV PRÁCE: OPTIMALIZACE PROVOZNÍHO REŽIMU PK VNOROVY I A VNOROVY II		DATUM	01/2020
		MĚŘITKO	
VÝKRES: PK VNOROVY I - 3D MODEL - UKLIDŇOVACÍ KOMORA		PŘÍLOHA Č.	11